



Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA  
Engenharia eletrônica

# **Análise da viabilidade de indicadores de infraestrutura e confiabilidade de redes móveis 4G**

Autor: Felipe dos Santos Cubo Iglesias  
Orientador: (Prof. Dr. Leonardo Aguayo)

Brasília, DF  
2014





Felipe dos Santos Cubo Iglesias

## **Análise da viabilidade de indicadores de infraestrutura e confiabilidade de redes móveis 4G**

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia eletrônica) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia eletrônica).

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: (Prof. Dr. Leonardo Aguayo)

Coorientador: (Prof. Dr. Euler Vilhena Garcia)

Brasília, DF

2014

---

Felipe dos Santos Cubo Iglesias

Análise da viabilidade de indicadores de infraestrutura e confiabilidade de redes móveis 4G/ Felipe dos Santos Cubo Iglesias. – Brasília, DF, 2014-  
98 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: (Prof. Dr. Leonardo Aguayo)

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA , 2014.

1. 4G. 2. LTE. I. (Prof. Dr. Leonardo Aguayo). II. Universidade de Brasília.  
III. Faculdade UnB Gama. IV. Análise da viabilidade de indicadores de infraestrutura e confiabilidade de redes móveis 4G

CDU 02:141:005.6

---

Felipe dos Santos Cubo Iglesias

## **Análise da viabilidade de indicadores de infraestrutura e confiabilidade de redes móveis 4G**

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia eletrônica) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia eletrônica).

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 2014:

---

**(Prof. Dr. Leonardo Aguayo)**  
Orientador

---

**Prof. Dr. Cristiano Jacques Miosso  
Rodrigues Mendes**  
Convidado 1

---

**Prof. Dr. Georges Daniel  
Amvame-Nze**  
Convidado 2

Brasília, DF  
2014



*Dedico este trabalho aos meus pais, família e amigos  
que mesmo de longe transmitiram paz, tranquilidade e confiança  
para o cumprimento dessa etapa da minha vida.*





# Agradecimentos

Gostaria primeiramente de agradecer aos meus pais, Marta Regina dos Santos e Adinael Cubo Iglesias pelo esforço desde o momento em que nasci e não mediram esforços para me proporcionar a melhor criação, com eles aprendi os mais altos valores da vida.

Agradeço em especial José Rubens Iglesias e Rosana Rabello que considero como pai e mãe, obrigado por acreditarem em mim, graças a vocês minha formação profissional esta sendo concretizada e não encontrei palavras para demonstrar minha eterna gratidão e devoção para com vocês.

A toda minha família, irmã, avós, tios e primos, obrigado pelo apoio e pela crença que sempre tiveram comigo.

Agradeço aos meus eternos amigos, que sempre estiveram do meu lado, nos momentos mais difíceis me apoiaram e ajudaram com dedicação e amor. Não importa a distância, vocês estarão sempre em meu coração.

Um agradecimento especial a minha namorada, Gabriella Casanova Alvarenga, que sempre apoiou minhas decisões, pacientemente soube entender os momentos de ausência e ajudou durante um dos períodos mais difíceis de minha vida.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Leonardo Aguayo pela oportunidade de trabalhar com um assunto novo que proporcionará uma valorização profissional de minha pessoa. Obrigado pelos ensinamentos e a paciência por ser um assunto que não é do escopo do meu curso de graduação. Agradeço a Deus por me dar forças para completar mais essa etapa da minha vida.

Enfim, muito obrigado a todos que de forma direta ou indireta estiveram ao meu lado me apoiando e acreditando em minha capacidade.



*“Se cheguei mais longe,  
foi porque me apoiei nos ombros de gigantes.”  
(Isaac Newton)*



# Resumo

O sistema de telefonia móvel no Brasil está passando por diversas mudanças, dentre essas quais a implementação de redes móveis de quarta geração (4G) utilizando o padrão LTE (*Long Term Evolution*). Este trabalho tem como objetivo principal propor indicadores de qualidade (KPI's - *Key Performance Indicators*) para redes 4G, de modo a permitir avaliar a infraestrutura e confiabilidade da implantação destas redes. Estes indicadores permitem complementar avaliações que hoje são baseadas somente na potência de sinal disponível em determinado local. Como metodologia de trabalho, adotou-se o emprego de um simulador *Open Source* disponível, utilizado para visualizar o comportamento da rede segundo parâmetros pré-definidos. Realizaram-se simulações em dois diferentes cenários, um deles com femtocélulas e outro sem, onde buscaram-se informações sobre o comportamento da rede em condições de sobrecarga devido a expansão do número de usuários conectados. Os *scripts* de simulação para ambos os casos foram elaborados de forma a se obter cenários próximos das condições reais, tendo como pano de fundo um estudo de caso voltado para o desempenho da rede em locais de grande concentração de usuários. Com base na análise do desempenho da rede em situação de sobrecarga atestou-se a melhoria do sistema quando utilizam-se femtocélulas. Dentre os diversos parâmetros mensurados, observou-se um aumento médio de 23,28Mbps/s no *throughput* médio das células e um correspondente aumento do valor do KPI proposto. Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se o uso de ferramentas de simulação comerciais, de modo a eliminar algumas limitações do simulador utilizado e assim complementar os resultados obtidos.

**Palavras-chaves:** 4G. LTE. QoS. KPI.



# Abstract

The mobile telephone system in Brazil is undergoing several changes, amongst these changes is the implementation of the fourth generation mobile network (4G) using the pattern LTE (*Long Term Evolution*). This work has as main objective to propose quality indicators and performance (KPI's - Key Performance Indicators) to 4G network, it allows to evaluate the the reliability of the infrastructure and deployment of these networks. This indicators allows a more complete evaluation of the mobile network, differently from the companies that evaluate only the power of the available signal at a specific location. As methodology, we adopted the use of an available and open source simulator, used to visualize the behavior of the network based on pre-defined parameters. Simulations were performed in two different scenarios, one with and one without femtocells, which we searched information about the behavior of the network under conditions of overload due to expansion of the number of connected users. The simulation scripts for both cases were prepared in order to obtain scenarios closer than real conditions, with the backdrop of a case study aimed at the performance of the network in places with a high concentration of users. Based on the analysis of network performance in overload situation, it was attested the improvement of the system when femtocells are used. Among several parameters measured, there was a mean increase of 23.28Mbits/s in the average cell throughput and a corresponding increase in the value of the proposed KPI. As a suggestion for future studies, we propose the use of commercial simulation tools, in order to remove some limitations of the used simulator and thus complement the results obtained.

**Key-words:** 4G. LTE. QoS. KPI.





# Lista de ilustrações

Figura 1 – Base de assinantes para diversos tipos de sistemas celulares no ano de 2001 (RAPPAPORT, 2009).	38
Figura 2 – Evolução das redes móveis de comunicação até o ano de 2012 (RYSAVY, 2012).	41
Figura 3 – Elementos da arquitetura LTE (HOLMA; TOSKALA, 2009).	43
Figura 4 – Exemplo da arquitetura LTE com redes 3GPP e redes que não são 3GPP (HOLMA; TOSKALA, 2009).	45
Figura 5 – Arquitetura LTE considerando sistemas mais antigos (HOLMA; TOSKALA, 2009).	46
Figura 6 – Exemplificação da comunicação bidirecional entre UE e <i>eNodeB</i> .	47
Figura 7 – Exemplo do espectro entre OFDM e sistemas convencionais de multiportadoras (AL-SHAHRANI; AL-OLYANI, 2009).	48
Figura 8 – Exemplo da diferença entre OFDM e OFDMA (ANRITSU, 2010).	48
Figura 9 – Exemplo de transmissão de um quadro de símbolos em OFDMA e SC-FDMA (ANRITSU, 2010).	49
Figura 10 – Estrutura do quadro tipo 1 (CARRASCO, 2011).	50
Figura 11 – Estrutura do <i>radioframe</i> do tipo 2 (CARRASCO, 2011).	50
Figura 12 – Estrutura do bloco de recurso (ANRITSU, 2010).	51
Figura 13 – Taxas de transmissão em [Mbps] para diferentes cenários de utilização do sistema LTE.	52
Figura 14 – Ilustração do fluxo de dados em transmissões SISO e SIMO.	54
Figura 15 – Ilustração do fluxo de dados em uma transmissão MISO que são utilizados nos modos 3 e 4.	55
Figura 16 – Ilustração do fluxo de dados em uma transmissão MIMO que é utilizado no modo 5.	55
Figura 17 – Valores dos parâmetros $C$ e $a(h_{[m]})$ para diferentes tipos de terreno (CARRASCO, 2011).	58
Figura 18 – Diferentes trajetos percorridos pelo mesmo sinal até o receptor.	60
Figura 19 – Características de QoS para LTE (COX, 2012).	63
Figura 20 – Distribuição das portadoras ao longo da interface de rede LTE (CARRASCO, 2011).	65
Figura 21 – KPI's definidos para a categoria <i>Acessibilidade</i> (CARRASCO, 2011).	67
Figura 22 – KPI's definidos para a categoria <i>Retenção</i> (CARRASCO, 2011).	67
Figura 23 – KPI's definidos para a categoria <i>Disponibilidade</i> (CARRASCO, 2011).	68
Figura 24 – KPI's definidos para a categoria <i>Mobilidade</i> (CARRASCO, 2011).	69
Figura 25 – KPI's definidos para a categoria <i>Integridade</i> (CARRASCO, 2011).	70

Figura 26 – Continuidade dos KPI's definidos para a categoria <i>Integridade</i> (CAR-RASCO, 2011). . . . .	71
Figura 27 – Mapa com distribuição dos <i>eNodeB</i> 's e UE's. . . . .	74
Figura 28 – Exemplo de propagação do sinal emitido pelos <i>eNodeB</i> 's considerando apenas o efeito de <i>fading</i> em (a) e em (b) considerando também efeito de <i>shadowing</i> . . . . .	76
Figura 29 – Gráfico do mapeamento do indicador de qualidade de canal dependendo do valor da relação sinal/ruído. . . . .	76
Figura 30 – Gráfico cumulativo da quantidade de usuários pelo valor de <i>throughput</i> médio e eficiência espectral média. . . . .	77
Figura 31 – Vista do estádio nacional de Brasília e área ao redor, imagem retirada do site da FIFA: <a href="http://www.fifa.com/worldcup/destination/stadiums/stadium=5002284/">www.fifa.com/worldcup/destination/stadiums/stadium=5002284/</a> acessado no dia 28/05/2014. . . . .	78
Figura 32 – Área em cinza representa a região de estudos de onde sairão os dados de tráfego. . . . .	79
Figura 33 – Comportamento de carga do sistema, porcentagem de usuários com <i>throughput</i> superior a 3MB/s em 33a e 5Mb/s em 33b. . . . .	80
Figura 34 – Comportamento de carga do sistema com relação ao valor médio de <i>throughput</i> das células ou recebidos pelos usuários. . . . .	81
Figura 35 – Características de ocupação dos blocos de recurso disponíveis pelo sistema. . . . .	81
Figura 36 – Comportamento de carga do sistema, porcentagem de usuários com <i>throughput</i> superior a 3MB/s em 36a e 5Mb/s em 36b utilizando femtocélulas para escoamento de tráfego. . . . .	84
Figura 37 – Comportamento de carga do sistema utilizando femtocélulas para escoamento de tráfego com relação ao valor médio de <i>throughput</i> das células ou recebidos pelos usuários. . . . .	85
Figura 38 – Comapração entre sistemas com e sem femtocélulas para a porcentagem de usuários com <i>throughput</i> superior a 3MB/s em 38a e 5Mb/s em 38b. . . . .	86
Figura 39 – Comapração entre sistemas com e sem femtocélulas, análise do <i>throughput</i> médio por células 39a e <i>throughput</i> médio por UE 39b. . . . .	87
Figura 40 – Comportamento de $KPI_{célula}$ com parâmetros fixados em $\gamma = 10$ , $\lambda = 90$ . . . . .	89
Figura 41 – Comportamento de $KPI_{célula}$ com parâmetros fixados em $\gamma = 50$ , $\lambda = 50$ . . . . .	89
Figura 42 – Comparação e comportamento dos valores do $KPI_{célula}$ para sistema simples (linha vermelha) e outro utilizando femtocélulas (linha azul). . . . .	90
Figura 43 – Quadro de medições realizadas pela ANATEL na cidade de Salvador em diferentes pontos(ANATEL, 2013). . . . .	93
Figura 44 – Mapeamento 4G e características do sinal segundo operadoras para a cidade de Brasília retirado do site ( <a href="http://www.opensignal.com">www.opensignal.com</a> ). . . . .	95

Figura 45 – Mapa da região de Brasília obtida com o <i>software CellPlan</i> ilustrando a propagação do sinal proveniente de três <i>eNodeB</i> 's instalados. . . . .	96
--	----



# Lista de tabelas

Tabela 1	– Tabela com alguns parâmetros de QoS para sistemas de terceira geração(HAARDT; MOHR, 2000).	40
Tabela 2	– Tabela que mostra a evolução das taxas de transferência de dados de acordo com as tecnologias que foram se sucedendo ao longo do tempo(ZARRINKOUB, 2014).	42
Tabela 3	– Dimensionamento dos blocos de recurso.	51
Tabela 4	– Configurações de antenas desenvolvidas para o LTE. Primeiro índice indica quantidade de antenas utilizadas para transmissão no enlace direto e segundo índice mostra a quantidade de antenas no enlace reverso.	53
Tabela 5	– Modos de transmissão MIMO em <i>downlink</i> para LTE.(PCTEL, 2011)	53
Tabela 6	– Tabela de decisão para migração entre os principais modos de trabalho SU-MIMO (CARRASCO, 2011).	56
Tabela 7	– Tabela da simulação para o comportamento de carga do sistema LTE para diversas quantidades de usuários por célula. Valores de <i>throughput</i> médio por UE e taxa de ocupação dos blocos de recursos estão mostrados dentre outros.	79
Tabela 8	– Tabela da simulação para o comportamento de carga do sistema LTE para diversas quantidades de usuários por célula em um sistema com femtocélulas inseridas.	84
Tabela 9	– Tabela com valores das diferenças entre a % de usuários acima dos patamares de 3 e 5Mb/s com e sem femtocélulas.	86
Tabela 10	– Tabela com valores das diferenças entre o <i>throughput</i> médio por UE e por célula em um sistema com e sem femtocélulas.	87



# Lista de abreviaturas e siglas

16-QAM	<i>16 - Quadrature Amplitude Modulation</i>
64-QAM	<i>64 - Quadrature Amplitude Modulation</i>
1G	Primeira Geração
2G	Segunda Geração
2,5G	Segunda/Terceira Geração
3G	Terceira Geração
4G	Quarta Geração
3GPP	<i>Third Generation Partnership Project</i>
AMBR	<i>Agregate Maximum Bit Rate</i>
ANATEL	<i>Angência Nacional de Telecomunicações</i>
ARP	<i>Alloctaion and Retention Priority</i>
BLER	<i>Block Error Ratio</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CL-SM	<i>Closed Loop - Spatial Multiplexing</i>
CQI	<i>Channel Quality Indicator</i>
CSI	<i>Channel State Information</i>
DL	<i>Downlink</i>
EDGE	<i>Enhanced Data rates for GSM Evolution</i>
EPC	<i>Envolved Packet Core</i>
EPS	<i>Envolved Pack System</i>
EURO-COST	<i>European Cooperative for Scientific and Technical</i>
E-UTRAN	<i>Envolved - UMTS Terrestrial Radio Access Network</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i>

FF	<i>Fast fading</i>
GBR	<i>Guaranteed Bit Rate</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
GSM	<i>Global System Mobile</i>
HSPA	<i>High Speed Packet Access</i>
HSPA+	<i>Envolved High Speed Packet Access</i>
IMS	<i>IP Multimedia Sub-system</i>
IMT-2000	<i>International Mobile Telecommunications 2000</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
IS-95	<i>Interim Standard-95</i>
IS-136	<i>Interim Standard-136</i>
KPI	<i>Key Performance Indicator</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MBR	<i>Maximum Bit Rate</i>
MIMO	<i>Multiple-Input Multiple-Output</i>
MISO	<i>Multiple-Input Single-Output</i>
MME	<i>Mobility Management Entity</i>
OFDMA	<i>Ortogonal Frequency Division Multiple Access</i>
OL-SM	<i>Open Loop - Spatial Multiplexing</i>
PAPR	<i>Peak-to-Average Power Ratio</i>
PDSCH	<i>Physical Downlink Shared Channel</i>
P-GW	<i>Packet Data Network Gateway</i>
PL	<i>Path Loss</i>
PMI	<i>Precoding Matrix Indicator</i>
PSC	<i>Physical Shared Channel</i>
PUCCH	<i>Physical Uplink Control Channel</i>



PUSCH	<i>Physical Uplink Shared Channel</i>
QCI	<i>Quality of Service Channel Information</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RB	<i>Resource Block</i>
RI	<i>Rank Indicator</i>
RTT	<i>Round Trip Time</i>
S-GW	<i>Serving Gateway</i>
SC-FDMA	<i>Single Carrier - Frequency Division Multiplex Access</i>
SIP	<i>Session Initiation Protocol</i>
SU-MIMO	<i>Single User - Multiple-Input Multiple-Output</i>
SL	<i>Slow fading</i>
SIMO	<i>Single-Input Multiple-Output</i>
SINR	<i>Signal to Interference-plus-Noise Ratio</i>
SNR	<i>Signal-Noise Ratio</i>
TDD	<i>Time Division Duplex</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
TRI	<i>Transmit Rank Indicator</i>
TTI	<i>Time Transmission Interval</i>
UE	<i>User Equipment</i>
UP	<i>Uplink</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunication System</i>
WCDMA	<i>Wideband Code Division Multiple Access</i>



# Sumário

<b>I</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>27</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>29</b>
1.1	Contextualização	29
1.2	Relevância do trabalho	29
1.3	Motivações	30
1.4	Objetivos	30
1.5	Metodologia	31
1.6	Organização do Trabalho	32
<b>II</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b>	<b>35</b>
<b>2</b>	<b>EVOLUÇÃO DAS REDES CELULARES</b>	<b>37</b>
2.1	Primeira geração (1G)	37
2.2	Segunda geração (2G)	37
2.3	Segunda/Terceira geração (2,5G)	38
2.4	Terceira geração (3G)	39
2.5	Quarta geração (4G)	40
<b>3</b>	<b>ESTRUTURA DO LTE</b>	<b>43</b>
3.1	Arquitetura da rede 4G-LTE	43
3.2	Camada física do LTE	46
3.2.1	<i>Downlink</i>	47
3.2.2	<i>Uplink</i>	49
3.2.3	Estrutura de Transmissão	49
3.2.4	MIMO	53
<b>3.3</b>	<b>Modelos de Canal para LTE</b>	<b>56</b>
3.3.1	<i>Path Loss</i>	57
3.3.1.1	Modelo Okumura-Hata	57
3.3.1.2	COST231-Hata	58
3.3.2	<i>Slow fading</i>	58
3.3.3	<i>Fast fading</i>	59
<b>4</b>	<b>INDICADORES DE QUALIDADE</b>	<b>63</b>
4.1	QoS - LTE	63
4.2	<i>Key Performance Indicators</i>	65
4.2.1	Acessibilidade	66

4.2.2	Retenção . . . . .	66
4.2.3	Disponibilidade . . . . .	66
4.2.4	Mobilidade . . . . .	66
4.2.5	Integridade . . . . .	68
<b>5</b>	<b>PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL . . . . .</b>	<b>73</b>
<b>5.1</b>	<b>Introdução ao Simulador . . . . .</b>	<b>73</b>
<b>5.2</b>	<b>Simulação do estudo de caso . . . . .</b>	<b>77</b>
5.2.1	Inserção de Femtocélulas . . . . .	82
5.2.2	Comparação entre os cenários de simulação . . . . .	85
5.2.3	Elaboração de indicadores de desempenho . . . . .	88
<b>III</b>	<b>CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS . . . . .</b>	<b>91</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS . . . . .</b>	<b>93</b>
<b>6.1</b>	<b>Conclusão . . . . .</b>	<b>93</b>
<b>6.2</b>	<b>Trabalhos Futuros . . . . .</b>	<b>95</b>
	<b>Referências . . . . .</b>	<b>97</b>

# Parte I

## Introdução



# 1 Introdução

## 1.1 Contextualização

O processo de globalização, no qual existe profunda integração econômica, social, cultural e política, fundamenta-se em um pilar extremamente importante chamado comunicações. A evolução das telecomunicações e o advento da internet permitiu que a distância física não fosse mais um grande problema para o ser humano.

Essa revolução foi impulsionada principalmente devido aos avanços da indústria eletrônica e microeletrônica que dia-a-dia surge com aparelhos e tecnologias à um menor custo permitindo acessibilidade do público em larga escala.

Novas tecnologias surgem e proporcionam melhores serviços e diversidade de aplicações possíveis, com isso a demanda por um fluxo de informações transmitido pela rede se torna cada vez maior e faz com que a indústria das telecomunicações desenvolva novas soluções que atendam essa demanda. Atualmente, encontra-se em implementação a tecnologia 4G, quarta geração de sistemas celulares baseado em transferência exclusivamente via IP *Internet Protocol*, com requisitos taxas de dados superiores às tecnologias precedentes.

No Brasil, eventos como a Copa do Mundo FIFA em 2014 e Jogos Olímpicos de 2016 serviram de impulso para a implementação dos serviços de telefonia móvel 4G. A Anatel (*Agência Nacional de Telecomunicações*) realizou em 2012 o primeiro leilão de frequências na faixa de 2,5 GHz destinada ao 4G e foi definido que o padrão utilizado seria o LTE (*Long Term Evolution*). Posteriormente a agência pretende disponibilizar a faixa de frequências que hoje é destinada a televisão analógica que será desativada devido a troca pelo sinal digital.

Para a medição da qualidade da rede tornam-se necessários indicadores de desempenho ou KPI's (*Key performance Indicators*). De posse do emprego e medição desses indicadores, operadoras de telefonia móvel podem melhorar a qualidade do serviço oferecido, e as agências reguladoras podem aferir se os parâmetros de qualidade estão aderentes às normas vigentes.

## 1.2 Relevância do trabalho

Os estudos visando simulações sistemáticas de uma rede de comunicação possuem grande importância quando queremos visualizar o seu comportamento antes de colocá-la realmente em operação, visto que permitem a prévia detecção e correção de possíveis

problemas e falhas.

Esse trabalho aborda a importância do estudo de uma rede móvel principalmente em condições de sobrecarga, esse estudo pode ser utilizado para verificar o comportamento em casos de eventos de grande porte.

Durante eventos como copa do mundo FIFA 2014 e jogos olímpicos do Rio de Janeiro espera-se um aumento considerável do número de pessoas e de aparelhos conectados a rede de telefonia móvel. Isso acarretará uma sobrecarga devido a elevada demanda por serviços (aplicações em internet, chamadas de voz, etc), justificando a realização de estudos e testes para verificar qual será o comportamento do sistema nestas situações. Esse trabalho analisa o desempenho de uma rede móvel LTE em condições de sobrecarga, em particular onde há grande número de usuários em uma região relativamente pequena.

Adicionalmente, cabe ressaltar que o escopo técnico deste trabalho não é ministrado nas disciplinas de graduação - o que tornou o trabalho desafiador e permitiu adquirir domínio de um assunto considerado relevante para o mercado de trabalho atual.

### 1.3 Motivações

A constante evolução das telecomunicações, novas tecnologias que vão surgindo no cenário mundial e a posição que o país se encontra em meio a toda essa mudança, faz com que o conhecimento desse sistema traga valorização para o engenheiro. O domínio de um assunto que atualmente é considerado o mais atual em padrão de telefonia móvel faz com que esse profissional seja requisitado pelas empresas do setor de comunicações.

KPI's e indicadores de QoS formam o principal conjunto de métricas que podem ser utilizadas para conferir a confiabilidade com que a rede móvel opera em diversos cenários. Conhecer cada um e poder propor alternativas de medição tornaram o trabalho desafiador.

### 1.4 Objetivos

O objetivo principal do trabalho é propor indicadores de desempenho e qualidade para serem utilizados no processo de validação das redes móveis 4G. Como pano de fundo para a análise, aproveita-se a realização de dois eventos esportivos de grande porte que ocorrerão no Brasil em um período de dois anos para aplicar as soluções que se pretendem propor.

Como objetivos específicos, podem-se listar:

- A análise do comportamento de rede em cenários controlados de sobrecarga usando KPI's tradicionais, como taxa de dados de usuários;



- Propor novos indicadores que reflitam a situação de sobrecarga e que possam ser usados em complemento aos KPI's tradicionais;
- Apresentar soluções de melhoria do desempenho em situação de sobrecarga, tendo em vista a aferição dos KPI's propostos.

## 1.5 Metodologia

A dissertação está dividida em três partes, assim como o método científico utilizado para cada uma dessas divisões.

Primeiramente a busca bibliográfica necessária para entender o processo de evolução das redes celulares, conceitos básicos de telecomunicação, terminologias utilizadas no campo de pesquisa. Autores clássicos que são trabalhados no ensino de graduação nessa área foram pesquisados, a principal fonte de informações básicas de redes foi retirada de (RAPPAPORT, 2009). O estudo sobre a tecnologia LTE teve como referências livros, artigos científicos, teses de mestrado e manuais disponibilizados pelo próprio 3GPP (*Third Generation Partnership Project*) através da plataforma <http://www.3gpp.org/> onde se pode encontrar a maioria das informações técnicas referentes ao LTE.

A parte prática do trabalho foi feita por meio de simulações, utilizou-se basicamente um *software* desenvolvido pelo Instituto de Telecomunicações da Universidade de Vienna na Áustria. Trata-se de um simulador LTE *open source* contendo praticamente todas as funcionalidades desenvolvidas até o presente momento. Utilizou-se o *software MATLAB* para realizar as simulações e obter as curvas com as informações desejadas, já que este simulador foi desenvolvido nessa linguagem. O trabalho de mestrado descrito em (CARRASCO, 2011), serviu de base para o entendimento e funcionamento da ferramenta de simulação, já que foi através deste mesmo trabalho que se descobriu a existência do mesmo.

Para a realização das simulações, elaboraram-se dois cenários na cidade de Brasília na região onde se encontra o estádio nacional. Foram criadas células e variando-se a quantidade de usuários nela conectada buscaram-se diversos parâmetros (*throughput* médio por UE, *throughput* médio por célula, porcentagem de usuários com *throughput* acima de 3Mb/s e 5Mb/s, porcentagem da utilização dos blocos de recursos por parte das células, etc). Esses parâmetros foram coletados para os dois cenários, onde o primeiro era um sistema simples com antenas de três setores e o segundo cenário contava com femtocélulas inseridas em diversos pontos para escoamento de tráfego.

Com os dados coletados para os dois cenários propostos, fez-se a comparação entre eles buscando avaliar se a inserção de femtocélulas provoca melhora significativa do desempenho da rede e validar os indicadores propostos para avaliação de desempenho do

sistema de telefonia móvel.

## 1.6 Organização do Trabalho

Esta dissertação está dividida em três partes: Introdução, Desenvolvimento e Conclusão.

A primeira parte contém o capítulo 1, sendo este o presente capítulo, dividido em seções onde apresenta-se a importância das telecomunicações no mundo, os fatores que impulsionaram a rápida implementação do 4G no Brasil devido aos eventos esportivos que ocorrerão em 2014 e 2016. A seção seguinte descreve a relevância do trabalho e do tema escolhido, apresentando a importância de se realizar testes e simulações para saber se o sistema irá suportar uma demanda muito grande solicitações de serviço. Em sequência tem-se as motivações que levaram a escolher um tema considerado recente para estudar e trabalhar. Os objetivos são mostrados exaltando o que se espera encontrar ao final, resultados que dizem como a rede se comportará mediante uma sobrecarga, quais parâmetros seriam os mais indicados para verificar o estado de funcionamento da rede e possíveis soluções para evitar que o estresse elevado acarrete um apagão do sistema. A metodologia de trabalho utilizada é apresentada mostrando quais materiais e ferramentas de simulação foram empregadas, assim como locais de busca e pesquisa bibliográfica serão considerados nesta dissertação.

A segunda parte do trabalho é composta de quatro capítulos que abordam o estudo teórico sobre comunicações, passando pelo estudo do padrão adotado no Brasil e em grande parte do mundo. Esse estudo permite compreender conceitos necessários sobre o sistema para sermos capazes de entender as informações extraídas das simulações e seus resultados. O capítulo 2 mostra de forma superficial o processo de evolução dos sistemas de comunicação no mundo, começando pela primeira geração de telefonia móvel que era puramente analógica, passando pela segunda até a quarta geração que se tornaram padrões quase que inteiramente digitais.

No capítulo 3, a seção 3.1 aborda como está fundamentada a arquitetura de rede do LTE, voltada totalmente para o serviço de comunicação através de IP, tanto voz quanto dados são transmitidos no mesmo sistema de pacotes. A interligação com estruturas de redes mais antigas também foi apresentada para melhor entendimento do sistema. A subseção 3.2 apresenta aquela que é a camada de mais baixo nível em um sistema de redes, a camada física. Nela são apresentados canais de transmissão de dados bidimensionais *Downlink* e *Uplink* nas subseções 3.2.1 e 3.2.2 respectivamente. Na seção subsequente é mostrado como é formada a estrutura de transmissão que são utilizadas pelos dois canais, tipos de *frames* transmitidos e uma descrição dos mesmos. A última subseção destaca uma das principais tecnologias que permite o LTE alcançar taxas de transferências

elevadas, o emprego de múltiplas antenas é apresentado mostrando como são empregadas os sete modos na rede. A seção 3.3 trata dos modelos de canais frequentemente usados no planejamento de redes móveis. Os tipos mais comuns de desvanecimento são abordados, perdas de caminho, passando pelos modelos clássicos de *Okumura-Hata* e *COST231-Hata*, desvanecimento rápido e lento são apresentados nas seções quaternárias 3.3.1.1 e 3.1.1.2 finalizando o capítulo 3.

Em seguida, no capítulo 4 são apresentados os conceitos de QoS (*Quality of service*) e KPI's (*Key Performance Indicators*), parâmetros essenciais utilizados no planejamento de rede em sistemas de telecomunicação que permitem verificar a qualidade da rede móvel. São listados indicadores pré-definidos pelo 3GPP órgão responsável pela padronização e desenvolvimento do LTE.

O capítulo 5, onde se inicia o trabalho experimental do estudo realizado, realiza-se uma pequena introdução ao simulador mostrando as características básicas de configuração e dados apresentados após a simulação. Em seguida se tem a simulação e coleta de dados para os dois cenários definidos no trabalho, um sistema com femtocélulas e outro sem. Realizando-se a comparação entre as informações obtidas e qual o efeito gerado quando se insere femtocélulas no sistema de telefonia móvel. O último item deste capítulo e principal objetivo do trabalho é a elaboração de um ou mais indicadores de desempenho de rede, onde através das informações coletadas verifica-se sua eficácia na medição de desempenho da rede nos dois cenários propostos.

A terceira e última parte reúne os tópicos de conclusão e sugestões de continuidade para o trabalho, compilando-se os resultados obtidos ao longo da dissertação faz-se uma análise geral do trabalho apresentado apontando os principais pontos abordados e sugerindo o que seria interessante para complementar nos estudos futuros.



## Parte II

### Desenvolvimento



## 2 Evolução das redes celulares

### 2.1 Primeira geração (1G)

O surgimento das comunicações móveis teve um grande impacto mundial quando deixou-se de utilizar essa tecnologia apenas para uso militar.

O sistema de primeira geração era baseado em eletrônica analógica pois a eletrônica digital estava em processo de desenvolvimento e aperfeiçoamento não sendo viável sua utilização em tais aplicações. Os serviços de telefonia móvel eram instalados em veículos devido seu elevado consumo de energia e consequentemente demandavam aparelhos com baterias de grandes dimensões (ESPÍNDOLA, 2011).

Os avanços da microeletrônica e tecnologia digital, possibilitaram construção de aparelhos compactos e leves, com baixo consumo de energia, e o conceito se tornou atraente para as pessoas, elevando a demanda por serviços de comunicação móvel e consequentemente obriga o aumento da capacidade do sistema em agregar mais usuários.

### 2.2 Segunda geração (2G)

A segunda geração dos sistemas celulares foi o primeiro conjunto de padrões de interface de ar sem fio a utilizar modulação digital (RAPPAPORT, 2009). Diferentemente dos padrões de primeira geração que utilizavam FDMA (*Frequency Division Multiple Access*), FDD (*Frequency Division Duplex*) e FM (*Frequency Modulation*) analógico, a mudança na segunda geração deve-se ao fato de utilizar modulações digitais, técnicas de acesso múltiplo por divisão de tempo TDMA (*Time Division Multiple Access*) e FDD ou por divisão de código CDMA (*Code Division Multiple Access*) e FDD. Dentro da segunda geração temos quatro padrões de sistemas telefônicos que foram implementados.

- **GSM** (*Global System Communication*): utiliza TDMA, predominando na Europa, Ásia, Austrália e América do Sul;
- **IS-136** (*Interim System-136*): utiliza TDMA, empregado nos Estados Unidos, algumas partes da América do Sul e Austrália
- **PDC** (*Personal Digital Cellular*): utiliza TDMA, semelhante ao IS-136 sendo utilizado no Japão
- **IS-95** (*Interim System-95*): único padrão que utilizava CDMA, ou *cdmaOne*, empregado na América do Norte, Coreia, Japão, China, América do Sul e Austrália

Introduzida no início dos anos 90, foi responsável por mudanças significativas nos aparelhos móveis e estações base, tanto em *hardware* quanto em *software* para processamento de informações. A necessidade de atender um número de clientes em alto crescimento, justifica a mudança de tecnologia de analógica para digital, pois se teve um aumento de até três vezes na capacidade geral do sistema.

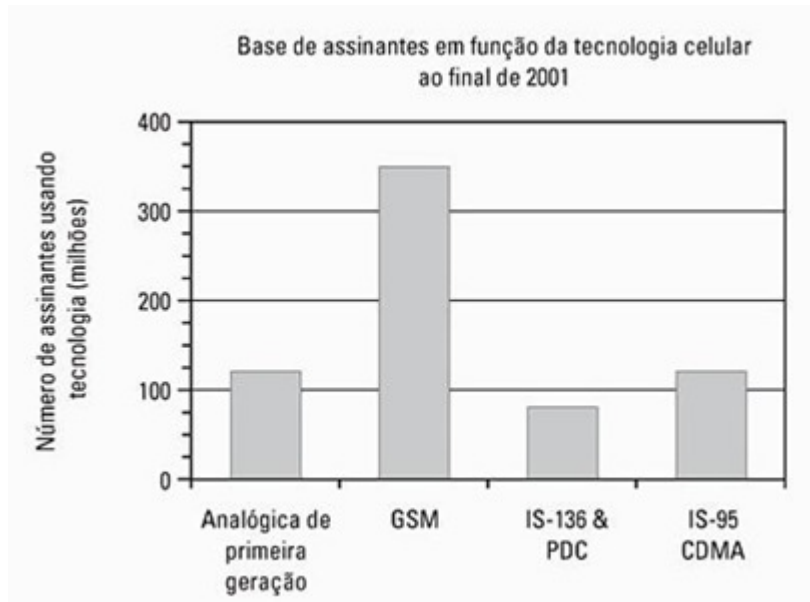


Figura 1 – Base de assinantes para diversos tipos de sistemas celulares no ano de 2001 (RAPPAPORT, 2009).

A Figura 1 mostra já para o ano de 2001 como estava distribuído a quantidade de assinantes nos serviços móveis de acordo com o padrão 2G, isso mostra a tendência de utilização do sistema GSM para comunicação móvel naquela época.

## 2.3 Segunda/Terceira geração (2,5G)

Os padrões de telefonia móvel de segunda geração foram desenvolvidos antes da internet se tornar tão popular, por isso a taxa com que os dados são transferidos nesse sistema é limitado à mesma ordem de grandeza da taxa de codificação de voz, devido a comutação do mesmo canal(RAPPAPORT, 2009). Mesmo com a taxa de transferência relativamente baixa, o sistema 2G fornece, embora limitado, acesso à internet e uma nova aplicação que surgia no sistema GSM denominado SMS (*Short Message Service*), esse serviço tornou-se muito popular na Europa e posteriormente no Japão.

A demanda por fluxo maior de dados com o surgimento de serviços *Web* resultou na implementação de alguns padrões voltados para navegação, permitindo aplicações *Web*, tráfego de *e-mail* e *m-commerce*. Esses padrões que surgiram não vieram para substituir os padrões já existentes, mas complementar os antigos, adicionando recursos para



utilização *Web*. No caso do GSM, sua atualização para o sistema 2,5G ocorreu seguindo três caminhos:

- **HSCSD** (*High Speed Circuit Switched Data*);
- **EDGE** (*Enhanced Data rates for Global Evolution*);
- **GPRS** (*General Packet Radio System*).

Cada um desses recursos podem ser conferidos em detalhes no capítulo dois de ([RAPPA-PORT, 2009](#)).

## 2.4 Terceira geração (3G)

Atualmente, a internet e a comunicação móvel podem ser consideradas indispensáveis nos diversos setores de atividade humana, e são fatores preponderantes no âmbito de desenvolvimento econômico mundial. Na busca pela globalização e integralização global, oferecer serviços cada vez mais sofisticados com capacidade multimídia e possibilitar que qualquer pessoa, em qualquer lugar possa estabelecer comunicação a qualquer hora surgiu como base para o desenvolvimento do sistema móvel de terceira geração([ADACHI; NAKAJIMA, 2000](#)). O sistema 3G que surgiu da evolução do GSM é conhecido como UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*), comparado ao sistema 2,5G teve melhoras em quesitos como: melhor eficiência espectral, cobertura global com *roaming* mundial e suporte para, além da voz, uma série de serviços multimídia.

- Acesso à Internet em alta velocidade;
- Visualização de vídeos e imagens em alta qualidade;
- Possibilidade de realização de vídeo conferência;
- Envio/Recebimento de dados com altas taxas de transferência.

Essas melhoras foram alcançadas através de sucessivas tecnologias, permitindo taxas de transferência de dados maiores ao longo do tempo:

- **HSPA** (*High Speed Packet Access*);
- **HSPA+** (*Evolved High Speed Packet Access*).

Baseadas em protocolos de acesso rádio WCDMA (*Wide-Band Code Division Multiple Access*), foram responsáveis por melhorias e aumento na taxa de transmissão em relação aos padrões existentes no mercado.

Quando falamos em padrões de sistemas de comunicação, definem-se requisitos de QoS (*Quality of service*) para os serviços oferecidos, esses parâmetros devem ser respeitados e cumpridos pelas operadoras de telefonia celular. Devemos ter em mente que o termo QoS começou a ter grande importância a partir desse sistema pois a parte relacionada com transferência de dados tornou-se muito forte. Na Tabela 1 estão alguns desses requisitos na implementação da rede 3G(HAARDT; MOHR, 2000).

Serviço	Faixa da taxa	Perda de pacotes	Atraso de pacotes
Transferência de dados	9,6Kbits/s - 1,5 Mbits/s	10e-12	10 - 500 s
Dados: email	9,6Kbits/s - 1,5 Mbits/s	10e-9	1 - 10 s
Voz - PCM	64Kbits/s	10e-4 - 10e-6	10 - 150 ms
Áudio: Videoconferência	64 Kbits/s - 152 Kbits/s	10e-7 - 10e-9	10 - 150 ms
Vídeo: Videoconferência	128 Kbits/s - 14 Mbits/s	10e-9	150 - 350 ms
HDTV - Qualidade TV	150 Mbits/s	10e-12	40 ms

Tabela 1 – Tabela com alguns parâmetros de QoS para sistemas de terceira geração(HAARDT; MOHR, 2000).

## 2.5 Quarta geração (4G)

O sistema de quarta geração, especificamente o LTE, foi a evolução do UMTS, começou a ser pensado e desenvolvido em 2004 pelo 3GPP, essa nova rede de acesso rádio foi desenvolvida segundo uma arquitetura voltada para comunicação utilizando somente protocolo IP tanto para voz quanto dados. Uma mudança na arquitetura foi necessária devido as características pensadas para o LTE, essa nova arquitetura é conhecida como SAE (*System Architecture Evolution*).

Um sistema como esse demanda anos desde a sua concepção inicial e sua real implementação, ao longo do desenvolvimento o 3GPP divide o projeto em *releases*, onde cada um representa uma atualização, serviço, incremento ou melhora do sistema. O LTE começou a ser desenvolvido a partir do *release 7* (RUMNEY, 2009), atualmente estamos no *release 13* como pode ser visto através da pagina [www.3gpp.org/releases](http://www.3gpp.org/releases). A motivação para uma mudança de padrão se deve às exigências para uma melhor qualidade do serviço, algumas das motivações para o LTE foram(RUMNEY, 2009):

- Maior capacidade de transmissão em redes sem fio;
- Redução do custo de transmissão por *bit*;
- Competição entre tecnologias semelhantes;
- Melhorias nas redes cabeadas.

Para o desenvolvimento dessa tecnologia, foram necessárias algumas modificações na arquitetura e interface de rede para que sejam alcançados os requisitos pré-estabelecidos. Alguns desses requisitos definidos pelo 3GPP para o LTE foram(3GPP, 2010):

- Taxa de vazão de dados de 100 Mbps no enlace direto e 50 Mbps no enlace reverso;
- Melhoria na eficiência espectral com relação à tecnologia precedente;
- Largura de banda escalonável nas frequências 1.4MHz, 3MHz, 5MHz, 10MHz, 15MHz e 20MHz;
- Redução da latência para 10ms;
- Suporte para interoperabilidade entre sistemas 3G do 3GPP e sistemas que não sejam 3GPP.

O LTE foi concebido através de técnicas já existentes mas que não eram utilizadas até então nas redes móveis:

- **OFDMA** (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*);
- **SC-FDMA** (*Single Carrier - Frequency Division Multiple Access*);
- **MIMO** (*Multiple Input Multiple Output*).

A Figura 2 a seguir mostra sucintamente como as redes móveis foram evoluindo até os dias de hoje, antecipando o possível sucessor para o LTE que já se encontra em processo de desenvolvimento.

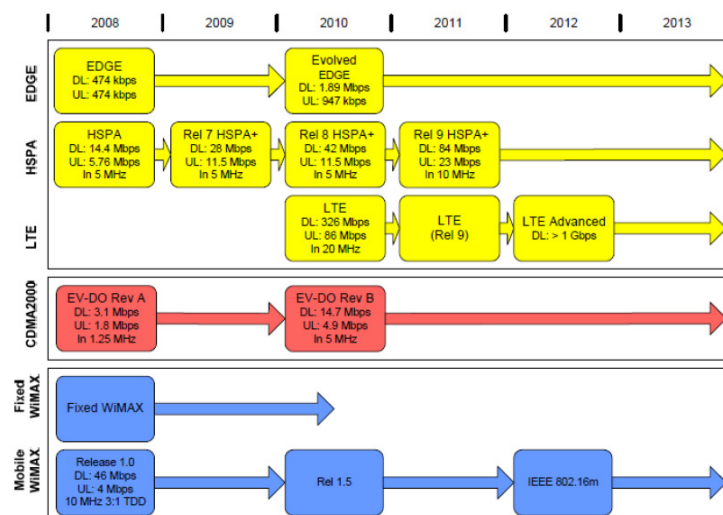


Figura 2 – Evolução das redes móveis de comunicação até o ano de 2012 (RYSAMY, 2012).

O LTE-*Advanced* promete taxas de transferência superiores ao seu antecessor, na faixa de 1Gb/s de transferência no enlace direto, por isso alguns autores e até o IMT-2000 (*International Mobile Telecommunications 2000*), órgão que define quais características o sistema deve cumprir para que seja considerado 3G, 4G, etc, define o LTE como 3G, mesmo sendo vendido com a etiqueta de 4G. Essa etiquetagem se tornou mais uma questão de *marketing* por parte das operadoras e pode ser que futuramente com o lançamento do LTE-*Advanced*, o LTE seja definido como um padrão 3,5G.

A Tabela 2 ilustra o quanto evoluiu a carga transmitida através do tempo, esses valores eram obtidos teoricamente com as melhores condições de transmissão.

Tecnologia	Taxa de pico teórica
GSM	9,6Kbps
IS-95	14,4Kbps
GPRS	171,2Kbps
EDGE	473Kbps
CDMA-2000 (1xRTT)	307Kbps
WCDMA (UMTS)	1,92Mbps
HSDPA	14Mbps
CDMA-2000 (1x-EV-DO)	3,1Mbps
HSPA+	84Mbps
WiMAX	26Mbps
LTE	300Mbps
LTE-Advanced	1Gbps

Tabela 2 – Tabela que mostra a evolução das taxas de transferência de dados de acordo com as tecnologias que foram se sucedendo ao longo do tempo(ZARRINKOUB, 2014).

## 3 Estrutura do LTE

### 3.1 Arquitetura da rede 4G-LTE

A arquitetura desenvolvida para o LTE reflete a diferença entre os padrões celulares de terceira geração com esse novo sistema, baseado somente na transmissão de dados por pacotes IP. A Figura 3 mostra os quatro elementos de uma arquitetura LTE pura, excluindo por enquanto a interface com sistemas antigos de telefonia móvel.

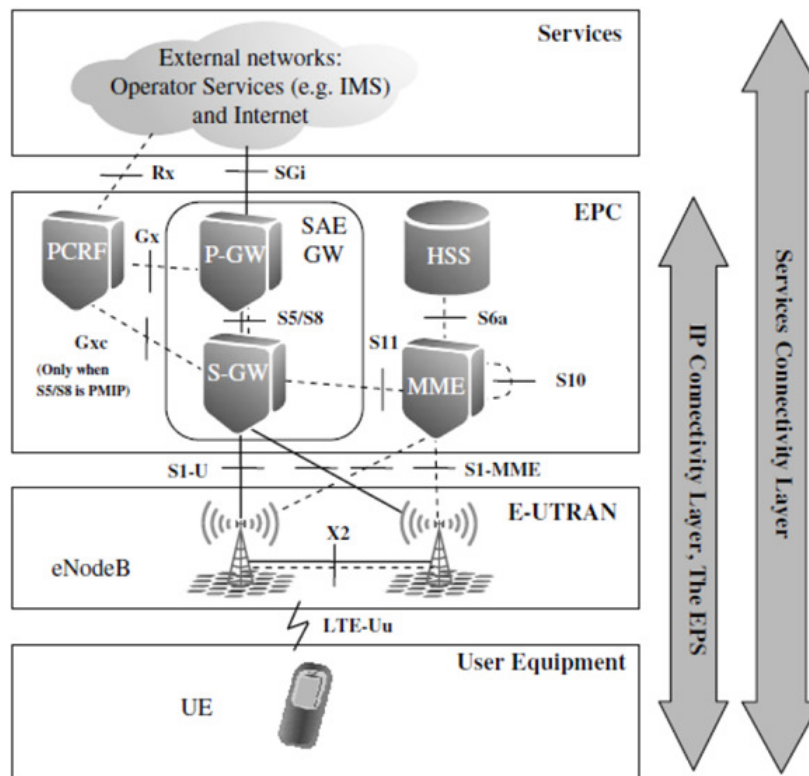


Figura 3 – Elementos da arquitetura LTE (HOLMA; TOSKALA, 2009).

Com relação às arquiteturas anteriores, foram atribuídas mais funcionalidades às estações-base que receberam mais recursos e são denominadas *eNodeB*. Alocação de novos recursos às estações base faz com que o tempo de execução em alguns serviços seja reduzido. Os *eNodeBs* fazem parte de um dos quatro domínios da arquitetura E-UTRAN (*Envolved - UMTS Terrestrial Radio Access*) que como o nome já diz, desempenha a interface de acesso rádio. Os quatro blocos que compõem o sistema são:

- **User Equipament:** dispositivo móvel utilizado pelo usuário para se conectar a rede e usufruir dos serviços. Transmite informações para controle de gestão de mobilidade

e localização.

- **E-UTRAN**: malha composta por *eNodeBs* que se comunicam entre si através da interface X2, ou se comunicam com o domínio EPC (*Envolved Packet Core*) através das interfaces S1-U ou S1-MME. Essa nova configuração permite que o *eNodeB* seja capaz de (CARRASCO, 2011):
  - Gestão de recursos de rádio (RRM);
  - Controle da ligação de rádio (RLC);
  - Controle de recursos de rádio (RRC);
  - Protocolo de convergência de pacotes de dados (PDCP).
- **EPC**: bloco também denominado *Core Network*, com os principais elementos da rede, principais funções e/ou recursos do sistema integram esse bloco.
  - **MME** (*Mobility Management Entity*): elemento de controle no EPC. Entre suas funções estão autenticação, segurança, gerenciamento de mobilidade (*handover*), gerenciamento de perfil do usuário, conexão e autorização de serviços. Fornece um plano de controle que permite a mobilidade contínua entre o LTE e redes móveis 2G/3G. Além de participar do processo de sinalização na manobra de *handover*, garante a localização de todos os UE's dentro da área de serviço e notifica o HSS (*Home Subscriber Server*) da localização contínua de cada um;
  - **S-GW** (*Serving Gateway*): encaminha e gerencia pacotes de dados entre P-GW e *eNodeB*, serve de base para realização de *handover* entre *eNodeBs* e armazena informações do UE como parâmetros de serviços IP suportados e informações sobre o roteamento interno de pacotes na rede;
  - **P-GW** (*Packet Data Network Gateway*): roteador de borda entre o EPC e redes de pacotes externos como Internet ou redes fixas e móveis baseadas em protocolos de Internet. Realiza a filtragem e controle de pacotes requeridos para os serviços em questão. Alocação de endereços IP para os equipamentos dos usuários para que possam se comunicar com outros dispositivos localizados em redes externas. Assim como o S-GW serve de suporte para mobilidade entre *eNodeB's*, o P-GW serve de base para a mobilidade entre redes 3GPP e redes não 3GPP. A Figura 4 mostra a arquitetura levando em consideração a comunicação com outros sistemas móveis 3GPP e redes que não são 3GPP.
  - **HSS**: desempenha um banco de dados com registros do usuário. Contém dados do perfil de inscrição do usuário, isto é, sobre os serviços nos quais o utilizador possui acesso, se o *roaming* é permitido na rede. Para cada registo de UE na

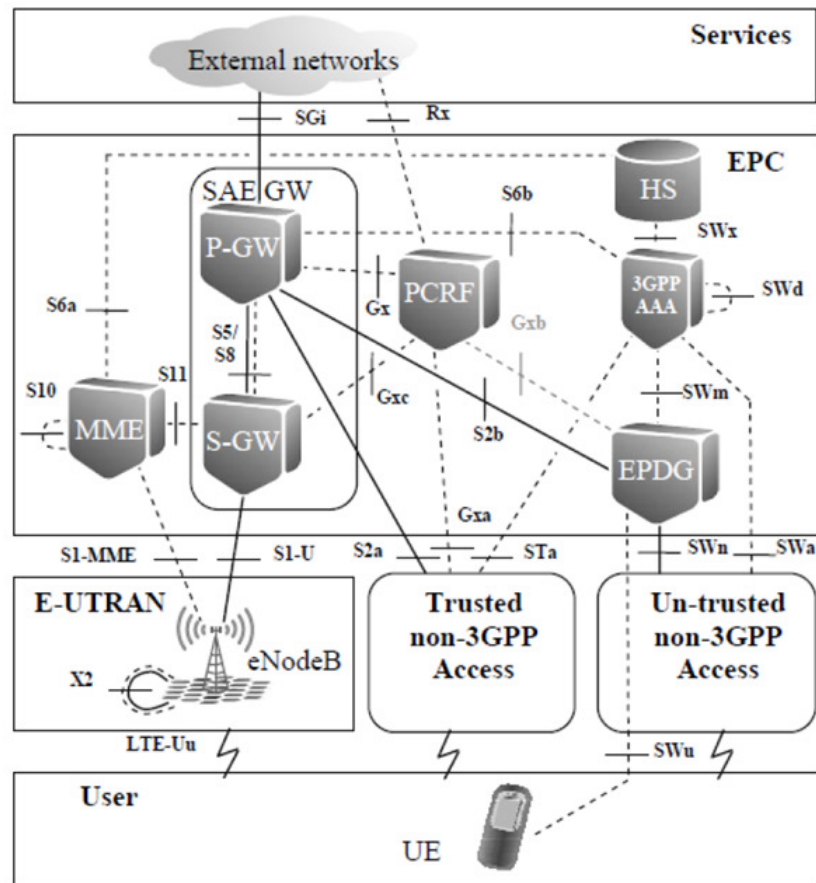


Figura 4 – Exemplo da arquitetura LTE com redes 3GPP e redes que não são 3GPP (HOLMA; TOSKALA, 2009).

rede, podemos saber a localização em nível do MME, pois os registros do HSS matêm o MME que serve de base para o UE;

- **PCRF** (*Policy and Charging Rules Function*): elemento de rede responsável pelo PCC (*Policy and Charging Control*) que rejeita ou permite pedidos de serviço multimídia, controla atribuição de recursos e fornece regras de tarifação com base no fluxo de serviços.
- **Services:** corresponde ao bloco de comunicação com serviços exteriores. São divididos em três categorias de acordo com os serviços oferecidos (NASCIMENTO, 2012):
  - Serviços IMS (*IP Multimedia Sub-system*), implementados pela operadora através do SIP (*Session Initiation Protocol*);
  - Serviços que não são IMS, implementados pelo operador através de um protocolo existente entre uma aplicação no UE e um servidor pertencente ao operador;
  - São os serviços implementados pelo operador, porém seu acesso é feito através da *Internet*, sendo que o UE pode se ligar a qualquer servidor e usufruir de



qualquer serviço.

A arquitetura desse sistema ainda possui elementos que permitem a conexão entre arquiteturas GSM, GPRS, UMTS e o próprio LTE, esse processo chamado de interoperabilidade permite que sistemas atuais conversem com sistemas antigos de telecomunicação. Essa arquitetura está mostrada na Fig. 5 abaixo.

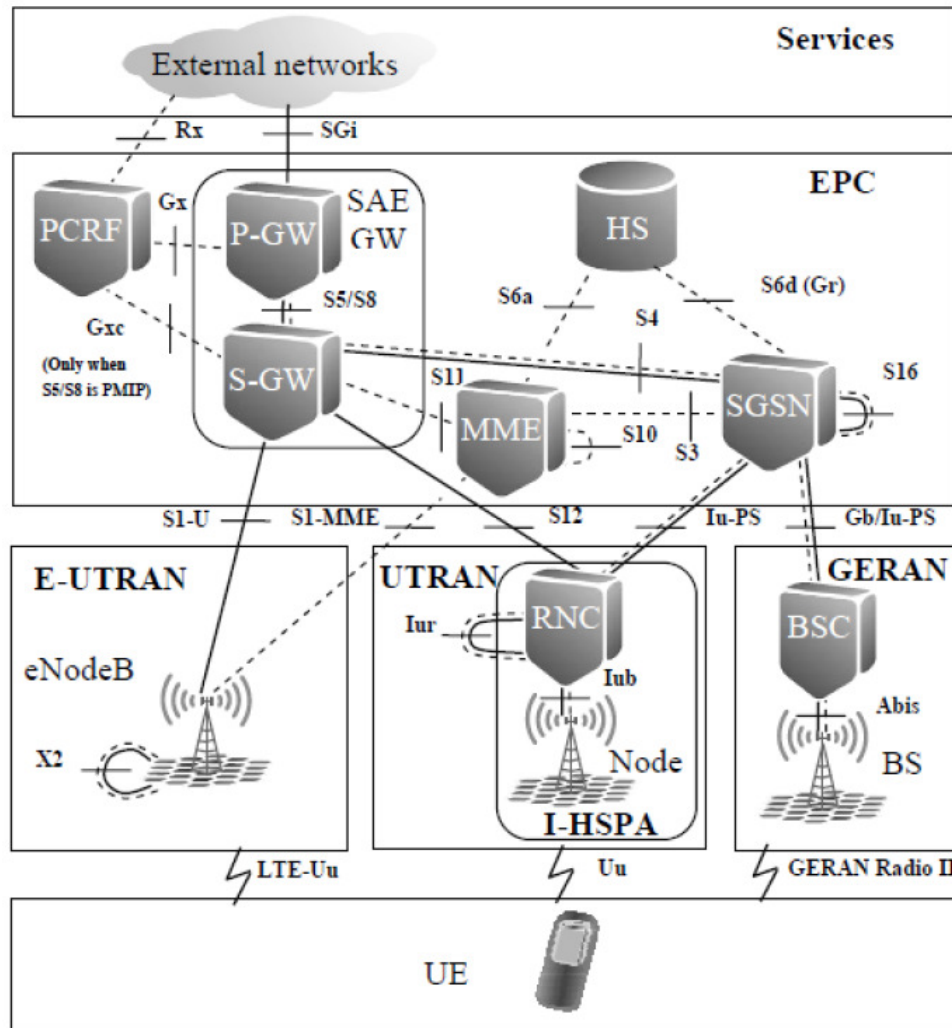


Figura 5 – Arquitetura LTE considerando sistemas mais antigos (HOLMA; TOSKALA, 2009).

## 3.2 Camada física do LTE

A camada física do LTE fornece as características de comunicação entre o UE e o sistema, o UE se comunica com os *eNodeB*'s que podem tomar decisões sobre o serviço requisitado, ou então, repassar ao EPC para que seja processado. O canal de dados da camada física ou PSC (*Physical Shared Channel*) é separado em dois fluxos



de comunicação: PDSCH (*Physical Downlink Shared Channel*) e PUSCH (*Physical Uplink Shared Channel*).

- **DL** (*Downlink*), quando os dados fluem do *eNodeB* para o UE;
- **UL** (*Uplink*), quando os dados fluem do UE para o *eNodeB*.

Podem também ser chamados de comunicação por enlace direto e reverso respectivamente. A Figura 6 mostra os sentidos do fluxo de dados.



Figura 6 – Exemplificação da comunicação bidirecional entre UE e *eNodeB*.

### 3.2.1 Downlink

Para o LTE foi utilizado OFDMA como técnica de acesso de múltiplos usuários devido ao seu bom desempenho quando comparado ao WCDMA utilizado no UMTS (HOLMA; TOSKALA, 2010). O OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) é um método de modulação e multiplexação que divide a banda do sinal em partes menores denominadas sub-portadoras. Essa tecnologia difere dos outros sistemas de modulações com multi-portadoras pois utiliza portadoras sobrepostas (não existe banda de guarda entre elas), essas sub-portadoras matematicamente são ortogonais entre si, permitindo envio e extração da informação de modo individual. Isso reduz as interferências entre portadoras co-adjacentes e aumenta consideravelmente a eficiência espectral do sistema. A Figura 7 mostra a diferença no espectro entre um sistema de modulação por multi-portadora comum e utilizando OFDM.

OFDM separa a banda de frequência da portadora em sub-portadoras espaçadas em 15KHz, essas sub-portadoras são moduladas individualmente, e foram especificadas na *Release 8*, sendo capaz de trabalhar de modo dinâmico o tipo de modulação de acordo

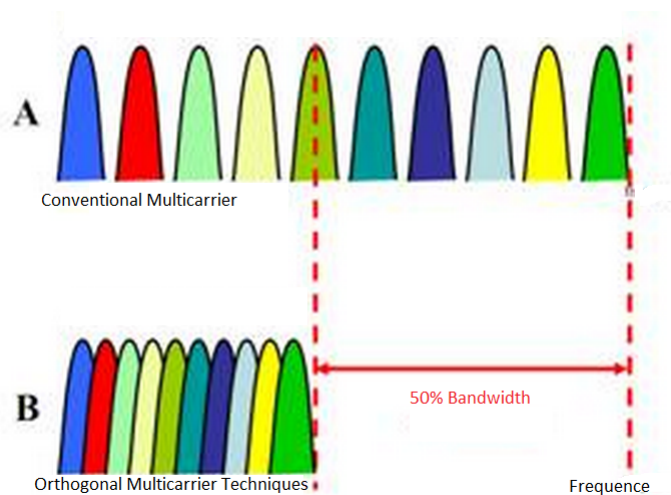


Figura 7 – Exemplo do espectro entre OFDM e sistemas convencionais de multi-portadoras (AL-SHAHRANI; AL-OLYANI, 2009).

com a potência do sinal e condições do canal entre UE e *eNodeB*. A distância entre o *eNodeB* e UE faz com que o sistema aumente a taxa de dados transmitida nas proximidades do emissor e diminua com um aumento na distância e condições do canal, sempre buscando manter a qualidade da transmissão e menor taxa de erro. Os tipos de modulação implementados foram:

- QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) - 2 *bits* por símbolo na transmissão;
- 16QAM (*16 Quadrature Amplitude Modulation*) - 4 *bits* por símbolo na transmissão;
- 64QAM (*64 Quadrature Amplitude Modulation*) - 6 *bits* por símbolo na transmissão;
- BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) é utilizada nos canais de controle de *uplink* por ser mais robusto.

A diferença entre OFDM e OFDMA está na utilização de uma banda de frequência específica para cada usuário, ou todos os usuários compartilham a banda ao mesmo tempo como mostrado na Fig. 8 abaixo.

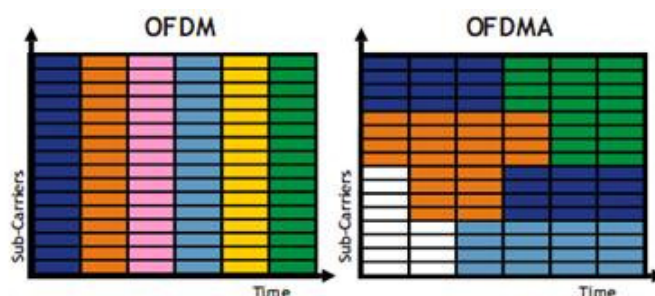


Figura 8 – Exemplo da diferença entre OFDM e OFDMA (ANRITSU, 2010).

### 3.2.2 Uplink

Enquanto o processo de *downlink* utiliza OFDMA, o 3GPP fez escolha da utilização da transmissão em FDD e TDD baseado em SC-FDMA para transmitir no enlace reverso, essa escolha foi feita levando em consideração a necessidade de aumentar a autonomia da bateria dos dispositivos móveis e redução nos custos do UE, pois a transmissão de um único símbolo por vez reduz o PAPR (*Peak-to-Average Power Ratio*), parâmetro diretamente ligado ao modo de operação do amplificador de potência instalado no transmissor do UE (HOLMA; TOSKALA, 2009).

A Figura 9 mostra um quadro de símbolos em QPSK utilizando OFDMA e SC-FDMA, a utilização de somente uma portadora faz com que a transmissão dos símbolos seja feita em série enquanto em OFDMA é realizada enviando os quatro símbolos em paralelo (um símbolo por sub-portadora).

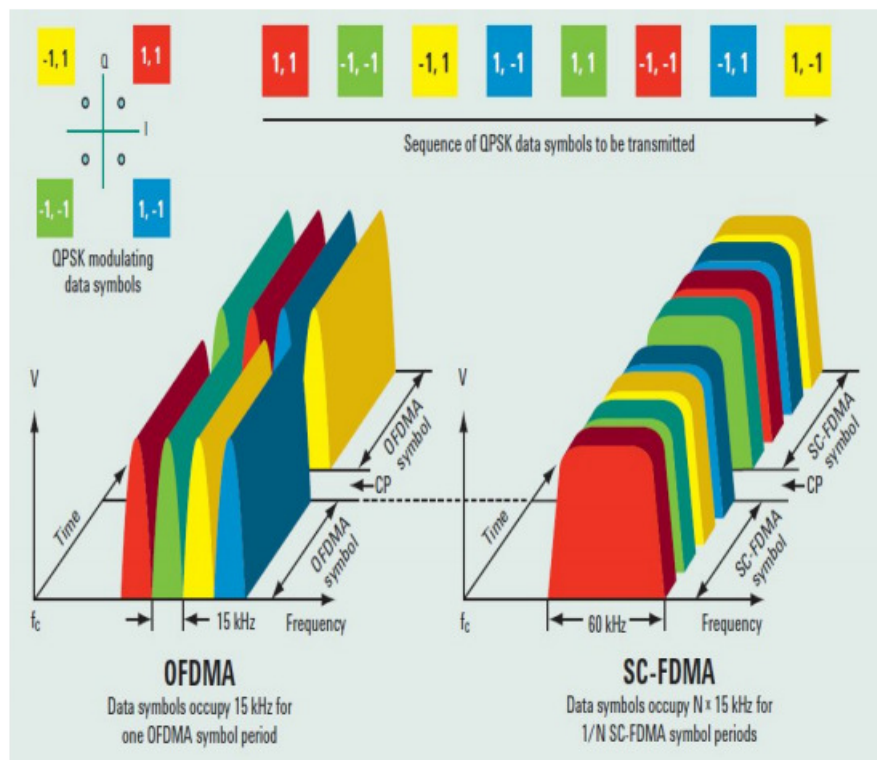


Figura 9 – Exemplo de transmissão de um quadro de símbolos em OFDMA e SC-FDMA (ANRITSU, 2010).

### 3.2.3 Estrutura de Transmissão

O sistema permite sincronização e gerenciamento de diferentes tipos de informações que trafegam entre o UE e *eNodeB*, para isso o 3GPP padronizou duas estruturas de *frames*

utilizada pelo LTE. Cada estrutura utiliza um tipo de duplexação diferente, FDD e TDD. Organizada segundo *radioframes* ou quadros, possuem dois tipos (1 e 2), ambas com a mesma duração de 10ms. Os quadros do tipo 1 são utilizados apenas em FDD, contendo 20 *timeslots* de 0,5ms cada. O conjunto de dois *timeslots* é caracterizado como 1 *subframe* ou subquadro (ANRITSU, 2010).

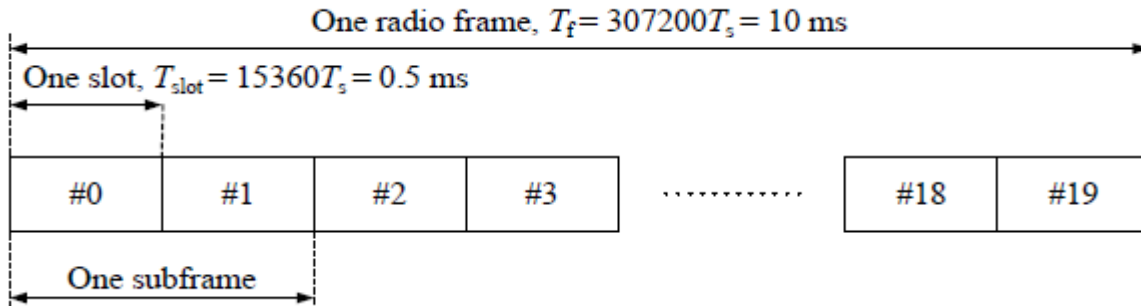


Figura 10 – Estrutura do quadro tipo 1 (CARRASCO, 2011).

Quadros do tipo 2 são aplicáveis à TDD, esses quadros podem ser divididos e com duração de 5ms, o sistema realiza então a comutação entre *downlink* e *uplink* com a periodicidade escolhida na configuração. Nesse caso existem subquadros contendo informações características como: DwPTS (*Downlink Pilot Time Slot*), GP (*Guard Period*) e UpPTS (*Uplink Pilot Time Slot*) que facilitam a utilização do acesso por TD-SCDMA (3GPP, 2009a).

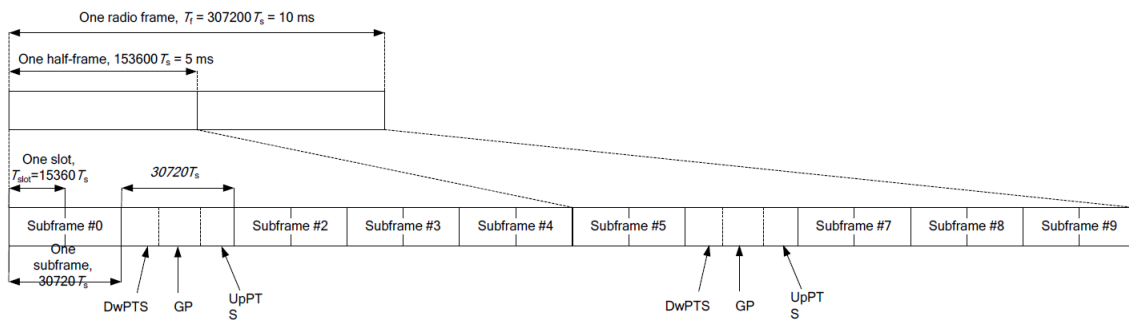


Figura 11 – Estrutura do *radioframe* do tipo 2 (CARRASCO, 2011).

Cada *timeslot* é denominado bloco de recursos, composto pelo número de símbolos em OFDM no domínio do tempo e o número de sub-portadoras no domínio da frequência que no total são 12 espaçadas em 15KHz totalizando uma banda de 180KHz por bloco. A Figura 12 mostra como foi idealizado o bloco de recurso. O UE recebe um elemento desse bloco de recurso denominado elemento de recurso, este é definido por uma sub-portadora e um símbolo OFDM transmitido pela antena.

Como o LTE pode trabalhar com diferentes larguras de banda que se estendem entre 1,4MHz até 20MHz, temos que a quantidade de blocos de recurso transmitidos varia

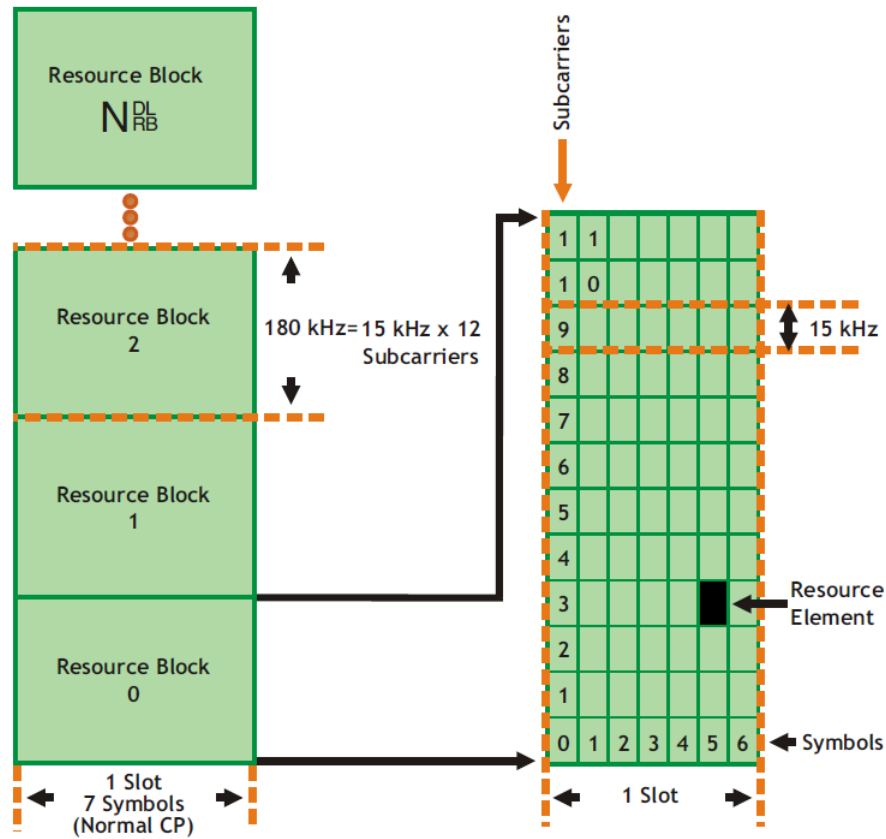


Figura 12 – Estrutura do bloco de recurso (ANRITSU, 2010).

de acordo com a Tab 3. Com esses dados pode-se prever qual a quantidade teórica de *bits* que podem ser transmitidos, ou seja, a vazão máxima de dados desse sistema.

Largura de banda(MHz)	Blocos transmitidos(max)	banda ocupada(MHz)
1.4	6	1.08
3	15	2.7
5	25	4.5
10	50	9
15	75	13.5
20	100	18

Tabela 3 – Dimensionamento dos blocos de recurso.

A cada 1ms é transmitido um *subframe* contendo 14 símbolos OFDM. Se considerarmos que a modulação utilizada seja 64-QAM que transporta 6 *bits* por bloco temos então 84 *bits* por *subframe*. Esse *subframe* por sua vez é enviado através de uma sub-portadora, trabalhando com 12 portadoras teremos 1008 *bits* por bloco de recurso. Através da Eq 3.1 podemos calcular o número de *bits* transmitido por bloco de recurso no sistema como

$$Rb = \frac{Nbs}{Hz} \times Ns \times \frac{Nsf}{Tsf}, \quad (3.1)$$

onde:

- $N_{bs}$  é o número de bits por símbolo transportados dentro um determinado esquema de modulação;
- $N_s$  representa o número de sub-portadoras;
- $N_{sf}$  é o número de símbolos por sub-quadro;
- $T_{sf}$  é o valor do período da sub-quadro (1ms).

O número máximo de bloco de recursos que podem ser enviados é 100 utilizando 20MHz de largura de banda, então teremos 100.8 Mbps por antena. Para finalizar, como veremos na próxima subseção, o LTE trabalha com tecnologia MIMO podendo transmitir dados utilizando até quatro antenas em paralelo alcançando uma taxa de 403.2 Mbps. Na prática não é o que realmente acontece pois esse valor foi obtido considerando as melhores situações e no caso apenas um usuário receba todos os recursos disponíveis do sistema.

A Figura 13 mostra para diferentes configurações (modulação, múltiplas antenas e largura de banda) a vazão de dados alcançada pelo sistema tanto em *downlink* quanto para *uplink*. São resultados teóricos, excluindo blocos dedicados à verificação de integridade e controle de canal.



	Modulation and coding	Bits/ symbol	MIMO usage	1.4MHz 6	3.0MHz 15	5.0MHz 25	10MHz 50	15MHz 75	20MHz 100
	QPSK 1/2	1.0	Single stream	0.8	2.2	3.7	7.4	11.2	14.9
	16QAM 1/2	2.0	Single stream	1.5	4.4	7.4	14.9	22.4	29.9
	16QAM 3/4	3.0	Single stream	2.3	6.6	11.1	22.3	33.6	44.8
	64QAM 3/4	4.5	Single stream	3.5	9.9	16.6	33.5	50.4	67.2
	64QAM 1/1	6.0	Single stream	4.6	13.2	22.2	44.7	67.2	89.7
	64QAM 3/4	9.0	2×2 MIMO	6.6	18.9	31.9	64.3	96.7	129.1
	64QAM 1/1	12.0	2×2 MIMO	8.8	25.3	42.5	85.7	128.9	172.1
	64QAM 1/1	24.0	4×4 MIMO	16.6	47.7	80.3	161.9	243.5	325.1
	Resource blocks								
	Modulation and coding	Bits/ symbol	MIMO usage	1.4MHz 6	3.0MHz 15	5.0MHz 25	10MHz 50	15MHz 75	20MHz 100
	QPSK 1/2	1.0	Single stream	0.9	2.2	3.6	7.2	10.8	14.4
	16QAM 1/2	2.0	Single stream	1.7	4.3	7.2	14.4	21.6	28.8
	16QAM 3/4	3.0	Single stream	2.6	6.5	10.8	21.6	32.4	43.2
	16QAM 1/1	4.0	Single stream	3.5	8.6	14.4	28.8	43.2	57.6
	64QAM 3/4	4.5	Single stream	3.9	9.7	16.2	32.4	48.6	64.8
	64QAM 1/1	6.0	Single stream	5.2	13.0	21.6	43.2	64.8	86.4

Figura 13 – Taxas de transmissão em [Mbps] para diferentes cenários de utilização do sistema LTE.

Esses valores não levam em consideração alguns parâmetros físicos reais, sofrendo alterações quando se realizam medidas experimentais em ambiente real.

### 3.2.4 MIMO

O LTE foi projetado para trabalhar utilizando tecnologia MIMO, permitindo comunicação entre UE e *eNodeB* através de múltiplas antenas sem a necessidade de largura de banda adicional, isso significa que cada antena oferece elementos de recurso ao UE e por meio de processamento de sinais, separa o fluxo de dados, aumentando consideravelmente a quantidade de informação recebida. Cinco configurações foram desenvolvidas (dois para *uplink* e três para *downlink*) como mostrados na Tabela 4.

Configuração das antenas	
<i>Uplink</i>	1x2 / 2x4
<i>Downlink</i>	2x2 / 4x2 / 4x4

Tabela 4 – Configurações de antenas desenvolvidas para o LTE. Primeiro índice indica quantidade de antenas utilizadas para transmissão no enlace direto e segundo índice mostra a quantidade de antenas no enlace reverso.

Alguns aspectos relacionados ao utilizar múltiplas antenas estão listados abaixo:

- Aumento da capacidade do canal e eficiência espectral;
- Ampliação da área de cobertura;
- Redução da taxa de erro de *bits*;
- Melhora da capacidade do sistema.

O sistema desenvolvido suporta sete configurações no modo de transmissão, esses modos são utilizados de forma a se obter desempenho máximo em relação aos canais (correlação entre os mesmos), condições de multi-percurso, SNR (*Signal-Noise Ratio*) e condições de mobilidade do usuário. A Tabela 5 lista as configurações suportadas pelo LTE e em seguida serão explicados as características de cada uma (PCTEL, 2011).

Modo de Transmissão	Esquema de transmissão
Modo 1	<i>Single Antenna Port</i>
Modo 2	<i>Transmit Diversity</i>
Modo 3	<i>Open-Loop Spatial Multiplexing</i>
Modo 4	<i>Closed-Loop Spatial Multiplexing</i>
Modo 5	<i>Multi-user MIMO</i>
Modo 6	<i>Closed-Loop Rank-1 Spatial Multiplexing</i>
Modo 7	<i>Single Antenna Port Beamforming</i>

Tabela 5 – Modos de transmissão MIMO em *downlink* para LTE.(PCTEL, 2011)



- **Modo 1 - *Single Antenna Port*:** já utilizado nos sistemas de comunicação, onde o fluxo de dados é transmitido através de uma antena e recebido por um usuário (SISO - *Single Input Single Output*) ou por mais de um usuário (SIMO - *Single Input Multiple Output*) como mostrado na Fig 14;

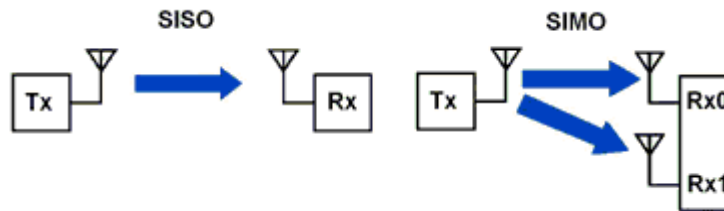


Figura 14 – Ilustração do fluxo de dados em transmissões SISO e SIMO.

- **Modo 2 - *Transmit Diversity*:** transmissão do mesmo fluxo de informação através de múltiplas antenas, o LTE permite o envio utilizando um, dois ou quatro transmissores simultâneos no modo SFBC (*Space Frequency Block Codes*), onde os símbolos são repetidos em diferentes sub-portadoras para cada antena.

Este modo é utilizado para canais comuns (controle e transmissão). Não há aumento da carga binária transmitida, neste caso aumenta-se a robustez do canal de transmissão e facilita a decodificação no UE necessitando de um menor valor SNR;

- **Modo 3 - OL-SM (*Open-Loop Spatial Multiplexing*):** dois fluxos de informação são transmitidos por duas ou mais antenas, o UE retorna o valor TRI (*Transmit Rank Indicator*), utilizado pelo *eNodeB* na seleção do número de camadas espaciais suportadas naquelas condições de canal e modulação que estão sendo utilizadas. O valor do CQI (*Channel Quality Indicator*) também usado pelo *eNodeB* seleciona o melhor esquema de modulação e codificação, assim como o número de recursos alocados ao usuário para se obter a melhor qualidade de transmissão, valores aceitáveis de BER (*Block Error Ratio*). Há um aumento do *throughput* em relação aos modos anteriores;
- **Modo 4 - CL-CM (*Closed-Loop Spatial Multiplexing*):** modo semelhante ao anterior, com a diferença de que o UE envia ao *eNodeB* informações detalhadas sobre as condições de cada canal de transmissão incluindo comportamento de caminhos múltiplos. Além do RI (*Rank Indicator*), o *eNodeB* recebe o parâmetro PMI (*Precoding Matrix Indicator*), que determina qual matriz de pré-codificação é a mais otimizada para as condições de canal decorrente.

Isso permite otimizar o processo de transmissão facilitando a separação dos sinais no receptor.



Esse é considerado o modo de maior desempenho da arquitetura MIMO no LTE, obtendo ganhos elevados de *throughput*.

Tanto o modo 3 quanto o modo 4 podem ser ilustrados pela Fig 15, onde um usuário recebe informações de diferentes transmissores;

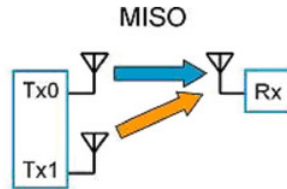


Figura 15 – Ilustração do fluxo de dados em uma transmissão MISO que são utilizados nos modos 3 e 4.

- **Modo 5 - *Multi-user MIMO*:** até o momento foram mostrados modos que são denominados SU-MIMO (*Single User - Multiple Input Multiple Output*), o modo 5 é semelhante ao modo 4 porém os fluxos de informação são direcionados para diferentes usuários, ou seja, múltiplos usuários compartilham os mesmos recursos e taxa de transmissão. Provoca-se um aumento no volume de dados global do sistema. A Figura 16 ilustra o modo de transmissão MIMO para duas antenas de transmissão.

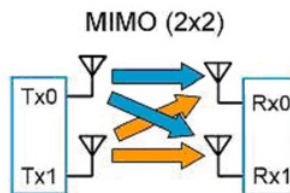


Figura 16 – Ilustração do fluxo de dados em uma transmissão MIMO que é utilizado no modo 5.

Os usuários são separados no domínio espacial e devido a padrões individuais de *beamforming* podem não ser correlacionados. Se as camadas não forem completamente ortogonais, teremos interferência entre os usuários. Esse modo é interessante quando as redes estiverem sobrecarregadas ([CARRASCO, 2011](#));

- **Modo 6 - *Closed-Loop Rank-1 Spatial Multiplexing*:** modo amplamente utilizado em situações onde o UE se encontra próximo aos limites da célula, com baixo SNR e influência de *multipath* elevada. A estação envia uma única palavra de código por todos os transmissores na mesma camada espacial. Esse modo tem sido associado ao *beamforming*;

- **Modo 7 - *Single Antenna Port Beamforming*:** modo *beamforming* onde uma única palavra de código é transmitida utilizando uma só camada espacial. Existe um sinal de referência dedicado permitindo transmissões de mais de quatro antenas. O UE faz uma estimativa da qualidade do canal a partir dos sinais de referência comuns nas antenas.

A arquitetura MIMO varia seu modo de funcionamento levando em consideração múltiplos fatores, como o estado que se encontra o canal de comunicação (grau de dispersão), qualidade do sinal através do SINR (*Signal to Interference-plus-Noise Ratio*), a velocidade do UE e a correlação entre os sinais recebidos pelas antenas receptoras. O processo de adaptação com relação aos parâmetros citados, está mostrado na Tab. 6 (CARRASCO, 2011).

Modo MIMO	SINR	Dispersão	Velocidade do UE	Adaptação Dinâmica
Modo 2	Baixa	Baixa	Alta	—
Modo 3	Alta	Alta	Alta	Modo 2
Modo 4	Alta	Alta	Baixa	Modo 2 ou Modo 6
Modo 6	Baixa	Baixa	Baixa	Modo 2

Tabela 6 – Tabela de decisão para migração entre os principais modos de trabalho SU-MIMO (CARRASCO, 2011).

### 3.3 Modelos de Canal para LTE

Canal de rádio é definido como o meio que carrega a informação do emissor para o receptor na forma de ondas eletromagnéticas. O estudo do canal visa implementar modelos matemáticos que mostram como as características desse sinal transmitido são afetadas durante a propagação e entender como esses problemas podem ser contornados para garantir que a informação enviada seja recebida com a menor distorção possível. *Fading* ou desvanecimento em um canal remete a variação da potência do sinal no tempo e na frequência enquanto este se propaga. O sinal apresentará alteração em sua amplitude e fase devido a diferentes fatores que incluem atenuação devido à distância, obstáculos, movimento por parte do emissor ou receptor e chegada de múltiplos sinais ao receptor devido ao fenômeno de *multipath* ou multi-percurso (MARWAT, 2011).

Os tipos mais comuns de *fading* encontrados na literatura em comunicações *Wi-reless* são:

- **PL (*Path Loss*)**: está categorizado como desvanecimento em larga escala, ocorre quando o UE se move através de distâncias consideráveis, depende da distância entre o transmissor e o receptor;

- **SL** (*Slow fading*): juntamente com PL é caracterizado como desvanecimento em larga escala, sua ocorrência está ligada a efeitos de *shadowing* (sombreamento) devido à obstrução do sinal por grandes objetos (prédios, montanhas, etc);
- **FF** (*Fast fading*): caracterizado como desvanecimento em pequena escala, ocorre devido à propagação em multi-percurso, movimento UE em distâncias comparáveis ao comprimento de onda da portadora.

Este trabalho não visa um estudo aprofundado e desenvolvimento matemático apurado de todos os modelos de propagação e canal existentes. Apenas um conhecimento de como são tratados os modelos e alguns parâmetros importantes que possam ser úteis no momento da simulação. O simulador já possui modelos de canal e propagação utilizando os conceitos apresentados aqui, caso o leitor se interesse por um estudo mais aprofundado, sugere-se a leitura das obras principais ([HAYKIN; MOHER, 2008](#)) e ([RAPPAPORT, 2009](#)), assim como outras citadas nesta seção.

### 3.3.1 Path Loss

Existem modelos matemáticos que foram desenvolvidos e permitem calcular a perda de potência do sinal em dB (*decibéis*) levando em consideração alguns parâmetros, como veremos a seguir os modelos mais utilizados durante o planejamento de redes celulares.

#### 3.3.1.1 Modelo Okumura-Hata

Em 1968, baseado em medidas experimentais, realizadas na faixa de frequências entre 150 e 2000 MHz, Okumura apresentou seu modelo em forma de curvas considerando variações na altura das precordial e diferentes tipos de terrenos. Hata em 1980 formulou matematicamente expressões que se aproximassem de algumas dessas curvas propostas por Okumura. A equação geral é dada por

$$PL_{[db]} = A + B \times \log(d_{[Km]}) + C, \quad (3.2)$$

no qual A e B estão definidas pelas Eqs 3.3 e 3.4, respectivamente,

$$A = 69,55 + 26,16 \log(f_{[MHz]}) - 13,82 \log(h_{b[m]}) - a(h_{m[m]})e \quad (3.3)$$

$$B = 44,9 - 6,55 \log(h_{b[m]}), \quad (3.4)$$

onde:

- $f_{[Hz]}$  é a frequência utilizada pelo sistema;

- $d_{[Km]}$  é a distância em Km entre o emissor e o receptor;
- $h_{[m]}$  representa a altura efetiva em metros do *eNodeB*;
- $h_{b[m]}$  representa a altura efetiva em metros do UE.

A variável  $C$  e o parâmetro  $a(h_{[m]})$  dependem do tipo de terreno considerado. A Figura 17 mostra possíveis valores de  $a(h_{[m]})$  para três tipos de terreno.

	$a(h_M)$	$C$
Áreas Metropolitanas	$\begin{cases} 8,29(\log(1,54h_M))^2 - 1,1 \text{ para } f \leq 200 \text{ MHz} \\ 3,2(\log(11,75h_M))^2 - 4,97 \text{ para } f \geq 400 \text{ MHz} \end{cases}$	0
Cidades pequenas e médias	$0,8 + (1,1 \log(f) - 0,7)h_M - 1,56 \log(f)$	0
Áreas Suburbanas	$0,8 + (1,1 \log(f) - 0,7)h_M - 1,56 \log(f)$	$-2 \left[ \log\left(\frac{f}{28}\right) \right]^2 - 5,4$
Áreas Rurais	$0,8 + (1,1 \log(f) - 0,7)h_M - 1,56 \log(f)$	$-4,78[\log(f)]^2 + 18,33 \log(f) - 40,98$

Figura 17 – Valores dos parâmetros  $C$  e  $a(h_{[m]})$  para diferentes tipos de terreno (CARRASCO, 2011).

Esse modelo responde bem para a faixa de frequências entre 150 e 1920 MHz e distâncias que variam de 1 a 20 Km, podendo ser extrapolado até 3000 MHz e distâncias entre 1 a 100Km (RAPAPORT, 2009).

### 3.3.1.2 COST231-Hata

Devido às limitações do modelo de propagação do modelo *Hata* a EURO-COST (*European Cooperative for Scientific and Technical*) formou um comitê para desenvolver uma versão que cobrisse um espectro maior de frequências se comparado ao modelo anterior. Esse novo modelo acrescenta alguns parâmetros resultando na Eq. 3.5 apresentada por

$$PL_{[dB]} = 46,3 + 33,9 \log(f_{[MHz]}) - 13,82 \log(h_{b[m]}) + B \log(d_{[m]}) - a(H_m) + D, \quad (3.5)$$

onde o parâmetro  $D$  é 0 dB para cidades médias e áreas suburbanas ou 3 dB para áreas metropolitanas. Esse modelo é considerado mais preciso que o modelo *Okumura-Hata* podendo ser extrapolado para frequências levemente superiores a 2 GHz, porém, não existem garantias da validade dos resultados nesse modelo em condições onde o LTE trabalhará no Brasil, com frequência de 2,5 GHz inicialmente (CARRASCO, 2011).

### 3.3.2 Slow fading

Como foi dito anteriormente, SL é tratado como um fenômeno de sombreamento que indica obstrução do sinal devido grandes objetos no caminho de propagação entre

emissor e receptor. Essas obstruções conduzem uma variação de forma aleatória da amplitude do sinal. As características do cenário de bloqueio do sinal são desconhecidas, então, se faz um estudo modelando de forma estatística seu comportamento (MARWAT, 2011).

Foi estabelecido experimentalmente que a relação de flutuação entre a potência recebida e transmitida é modelada por uma distribuição log-normal. Levando em consideração que a razão das potências transmitida e recebida após o efeito de sombreamento sejam variáveis aleatórias  $P_s$  na escala linear e  $S$  na escala  $dB$  sendo,  $S = 10\log(P_s)$ . Na escala linear, a distribuição de probabilidade de  $P_s$  segue a distribuição log-normal é dada pela relação

$$p(P_s) = \frac{10/\ln(10)}{\sqrt{2\pi}\sigma_{dB}P_s} \exp\left[-\frac{(10\log P_s - \mu_{dB})^2}{2\sigma_{dB}^2}\right], \quad (3.6)$$

onde  $\mu_{dB}$  é média de  $S$  em  $dB$  e  $\sigma_{dB}$  é o desvio padrão de  $S$  também em  $dB$ .  $S$  possui uma distribuição normal. Sua distribuição de probabilidade em  $dB$  é gaussiana e pode ser expressa como

$$p(S) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{dB}P_s} \exp\left[-\frac{(S - \mu_{dB})^2}{2\sigma_{dB}^2}\right], \quad (3.7)$$

essa distribuição de probabilidade exige o conhecimento de  $\mu_{dB}$  e  $\sigma_{dB}$ , se o efeito de sombreamento for modelado como um modelo simples então  $\mu_{dB}$  é o mesmo valor utilizado em *Path Loss*. Caso o o efeito de sombreamento for considerado separadamente então  $\mu_{dB}$  possui valor nulo (MARWAT, 2011).

### 3.3.3 Fast fading

Termo relacionado com a flutuação da amplitude de um sinal emitido. Esse fenômeno de curta duração possui menor efeito quando comparado à *Path Loss* e *Slow fading*. Sua ocorrência é ligada a fenômenos de multipercuso onde o receptor recebe o mesmo sinal transmitido diversas vezes em um período curto de tempo, resultante de vários caminhos de propagação tomados por esse sinal, que sofre reflexão, difração e dispersão devido objetos ao longo do percurso.

A Figura 18 ilustra um cenário onde se tem a ocorrência de multipercuso tomado por um mesmo sinal, por consequência teremos sinais que chegam ao receptor em diferentes instantes de tempo.

Estes sinais que chegam ao receptor provenientes de  $n$  canais distintos, a resultante de todos os sinais que chegam ao receptor é dada pela Eq. 3.8

$$h(\tau) = \sum_{n=1}^N h_n e^{-j2\pi f_c \tau_n} \delta(\tau - \tau_n), \quad (3.8)$$

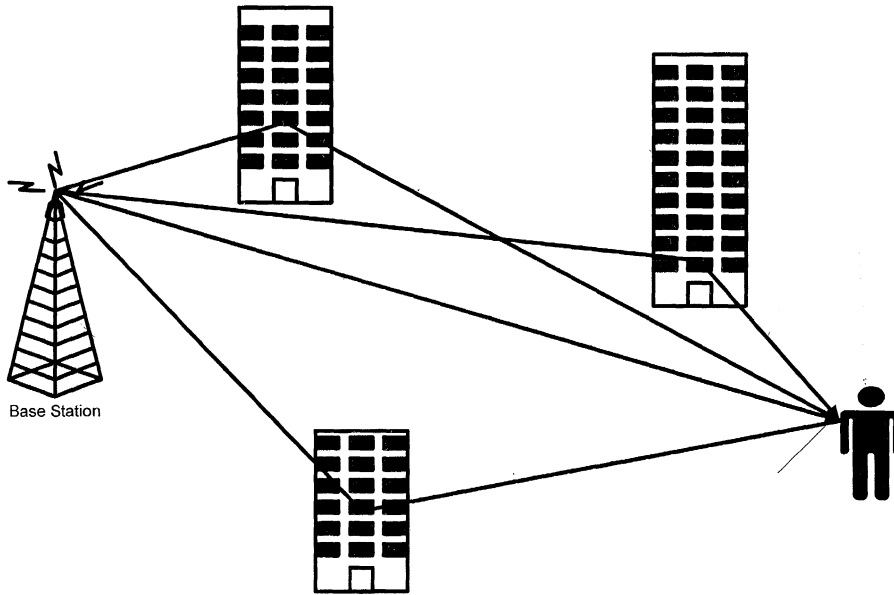


Figura 18 – Diferentes trajetos percorridos pelo mesmo sinal até o receptor.

onde representa a resposta impulsional do canal,  $f_c$  corresponde a frequência da sub-portadora e  $\delta(\tau)$  é a função impulso de Dirac. A chegada do mesmo sinal em diferentes instantes de tempo produz um efeito no receptor de filtro em certas frequências, por isso comumente chamamos de *seletividade em frequências*.

Outro conceito é o de *seletividade no tempo*, onde os canais são adotados como variantes no tempo devido a dispersão e mobilidade do UE. Neste caso a resposta impulsional contém termos que sejam dependentes do tempo, ou seja,  $h_n$  e  $\tau_n$  são dependentes do instante de tempo que visualizamos.

$$h(\tau, t) = \sum_{n=1}^N h_n(t) e^{-j2\pi f_c \tau_n(t)} \delta(\tau - \tau_n(t)), \quad (3.9)$$

a Equação 3.9 é a forma reescrita da Eq. 3.8 considerando o canal como variante no tempo.

A seletividade no tempo ocorre por duas razões:

- O canal varia com o tempo a amplitude dos sinais que chegam por outros caminhos;
- O emissor e/ou receptor encontram-se em movimento gerando efeito Doppler.

Os modelos matemáticos mais utilizados encontrados na literatura foram (MARWAT, 2011):

- Modelo de Clarke;
- Modelo de Jakes;

- Modelo Dent;
- Modelo de Jakes melhorado.

Como este trabalho não tem como finalidade descrever cada modelo mas apenas indicar para o leitor quais são os mais utilizados, deixa-se na bibliografia a sugestão de material onde podem ser encontrados com mais detalhes.





## 4 Indicadores de qualidade

### 4.1 QoS - LTE

A tecnologia LTE padronizada pelo 3GPP é baseada em serviço de dados, esta tecnologia está programada para fornecer suporte ao tráfego baseando-se em protocolos IP com QoS do tipo *end-to-end*.

Os requisitos de QoS, como já citado, são definidos como um conjunto de requisitos que definem níveis aceitáveis de operação para fornecimento de determinado serviço. Existem critérios que são utilizados e permitem definir a qualidade do serviço. Alguns desses critérios são:

- **Débito:** define o volume de *bits* transmitidos por unidade de tempo;
- **Latência:** atraso em relação à entrega de pacotes;
- **Perda de pacote:** representa a não entrega de um pacote dentre um número de pacotes enviado.

Existem dentro das especificações cinco parâmetros de qualidade que foram definidos em (3GPP, 2010) pelo 3GPP. A Figura 19 mostra valores para os cinco parâmetros definidos em alguns exemplos de aplicações.

QCI	Resource type	Packet error/ loss rate	Packet delay budget (ms)	QCI priority	Example services
1	GBR	$10^{-2}$	100	2	Conversational voice
2		$10^{-3}$	150	4	Real-time video
3		$10^{-3}$	50	3	Real-time games
4		$10^{-6}$	300	5	Buffered video
5	Non GBR	$10^{-6}$	100	1	IMS signalling
6		$10^{-6}$	300	6	Buffered video, TCP file transfers
7		$10^{-3}$	100	7	Voice, real-time video, real-time games
8		$10^{-6}$	300	8	Buffered video, TCP file transfers
9		$10^{-6}$	300	9	Buffered video, TCP file transfers

Figura 19 – Características de QoS para LTE (COX, 2012).

A seguir tem-se uma pequena descrição dos parâmetros apresentados na Fig 19.

- **QCI (*QoS Class Identifier*):** esse primeiro índice transmitido identifica um conjunto de valores definidos para os atributos QoS;

- **Resource Type:** as classes de serviço estão separadas em dois tipos, GBR (*Guaranteed Bit Rate*) que possui a demanda de dados garantida para determinado serviço e Non-GBR (*Non - Guaranteed Bit Rate*) que não possui garantia na demanda de dados;
- **Packet Error / loss rate:** parâmetro utilizado para configurar possíveis retransmissões de pacotes, contabiliza a quantidade de erros no envio dos pacotes de dados;
- **Packet delay budget:** parâmetro utilizado para manter um processo de escalonamento dos pacotes de acordo com o serviço requisitado;
- **Priority:** define a prioridade no envio de pacotes pela interface rádio.

Além dessas classes já definidas, as operadoras dispõem de três outros atributos para criação de suas próprias classes proprietárias, sendo esses atributos listados abaixo.

- **ARP** (*Allocation and Retention Priority*): indica prioridade entre as portadoras, utilizado para aceitar, modificar e liberar essas portadoras de um usuário;
- **MBR** (*Maximum Bit Rate*) e **AMBR** (*Agregate Maximum Bit Rate*): o primeiro define a vazão de dados máxima oferecida por uma portadora enquanto que o GBR define a carga de dados efetiva daquela portadora. O segundo atributo exclusivo de um serviço Non-GBR identifica a taxa máxima de transmissão por grupo de portadoras EPS (*Envolved Packet System*) para um único usuário da rede;
- **Latência:** medida através do RTT (*Round Trip Time*), tempo que um pacote IP leva para ir e voltar entre o UE e o servidor. Importante em serviços que demandam latência baixa mesmo que a vazão de dados não seja elevada.

O esquema de portadoras estabelecido no LTE está mostrado na Fig. 20, onde podem ser vistas todas as interfaces de ligação da rede.

Para cada UE é alocada uma portadora que o conecta com todos os elementos da rede (ligação *end-to-end*), mantendo uma conectividade IP com serviços de QoS relativamente baixos, a medida que o usuário demanda serviços com prioridades mais elevadas, o sistema aloca dinamicamente novas portadoras para cumprir o serviço com os requisitos exigidos.

Uma das maneiras de como o sistema se adapta as condições de transmissão do canal é fazendo com que o UE meça três dos indicadores mencionados e com isso estimar a qualidade da conexão em *downlink*, são eles: CQI, PMI e RI que juntos formam o CSI (*Channel State Information*). Quando a medição é feita, o UE passa essas informações ao *eNodeB* pelo canal de *uplink* que adapta o tipo de transmissão para manter a melhor

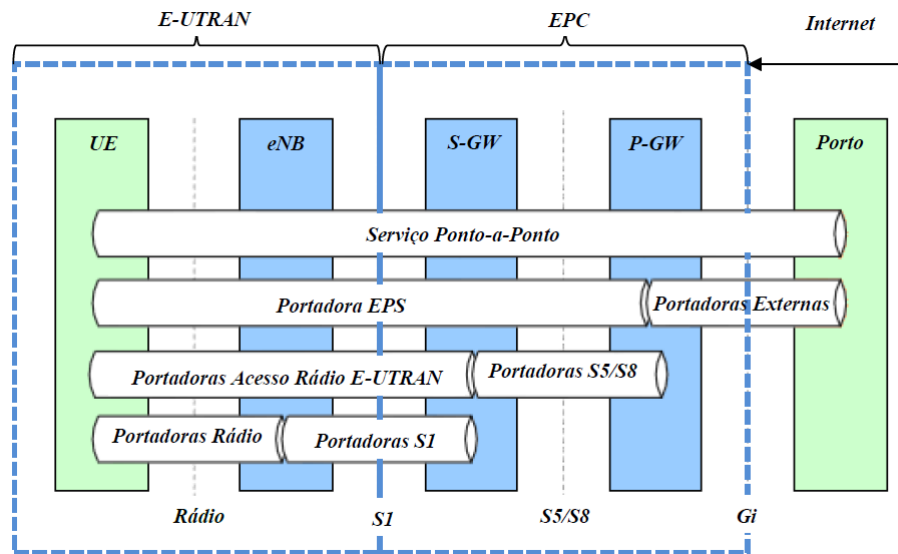


Figura 20 – Distribuição das portadoras ao longo da interface de rede LTE (CARRASCO, 2011).

qualidade. O CQI (*Channel Quality Indicator*) indica qual o tipo de modulação e codificação são necessárias para o qual obtém-se um BLER (*Block Error Ratio*) de no máximo 10%, seus valores foram definidos entre 0 (canal com qualidade inferior) e 15 (canal com melhor qualidade de transmissão). Esse parâmetro pode ser repassado ao *eNodeB* de duas formas

- Periodicamente através dos canais PUCCH (*Physical Uplink Control Channel*) e PUSCH (*Physical Uplink Shared Channel*);
- Aperiódico via PUSCH. Neste caso o *eNodeB* faz requisição explícita ao UE para envio do CQI.

## 4.2 Key Performance Indicators

Quando trabalhamos com redes móveis são necessários indicadores que permitam medir o funcionamento da rede identificando falhas e problemas existentes. Para que possamos caracterizar a rede móvel são necessários indicadores e métricas que permitam realizar essa análise de forma mais profunda. Serão apresentados nesta seção indicadores para análise do desempenho da rede LTE, esses indicadores podem ser aqueles já utilizados em arquiteturas anteriores quanto exclusivas do padrão LTE. Definidas pelo 3GPP existem cinco categorias que classificam os KPI's (*Key Performance Indicators*) e estão listadas abaixo (CARRASCO, 2011).

- **Acessibilidade;**

- **Retenção;**
- **Disponibilidade;**
- **Mobilidade;**
- **Integridade.**

Nas subseções a seguir serão detalhados cada uma das classificações apresentando uma breve descrição, problemas que possam ocorrer caso sejam ignorados esses indicadores, efeitos que podem ser induzidos devido aos problemas relatados e formas de medição.

#### 4.2.1 Acessibilidade

O primeiro ponto e principal de um serviço móvel é o estabelecimento da conexão entre o usuário e a rede, se o utilizador não consegue se conectar isso acarreta insatisfação e conseqüentemente perda de clientes, o que é extremamente indesejável para uma prestadora de serviço. Então torna-se necessário indicadores que fornecessem informações às companhias sobre como a rede está se comportando em termos de acessibilidade. Na Figura 21 temos os KPI's definidos para esta categoria.

#### 4.2.2 Retenção

Após o usuário acessar a rede móvel, este espera se manter conectado durante todo o tempo de utilização dos serviços. Existem é claro, momentos em que a conexão sofrerá uma possível queda devido a diversos fatores, por isso é necessário definir KPI's que permitem avaliar o desempenho da rede no quesito *Retenção*, ou seja, quão eficiente o sistema é perante as interrupções e quebras de serviço. Os KPI's definidos para essa categoria estão mostrados na Fig. 22 a seguir.

#### 4.2.3 Disponibilidade

Os KPI's dessa categoria medem a indisponibilidade do serviço, se o usuário não tem acesso a rede o operador não poder realizar qualquer tipo de cobrança. Serviços indisponíveis acarretam insatisfação por parte dos clientes, conseqüentemente prejuízo para a empresa fornecedora de serviço.

Os Indicadores de disponibilidade mostram a fração do tempo em que a rede se encontra em modo ativo. A Figura 23 mostra os dois indicadores dessa categoria.

#### 4.2.4 Mobilidade

Por se tratar de uma rede móvel, é necessário medir a qualidade da rede e dos serviços perante a mobilidade do usuário portando seu UE. Diretamente ligado com a mo-

Key Performance Indicators	Descrição	Problemas típicos	Efeitos dos problemas	Medição
<i>Attach Success Ratio</i>	Razão entre <i>attach's</i> bem-sucedidos e todas as tentativas efetuadas.	Rejeição: a subscrição do utilizador não permite o acesso. Falha: problemas nos processos de acesso aleatório ou no estabelecimento de uma conexão <i>RRC</i> .	O <i>UE</i> não se consegue registar na rede e não pode utilizar quaisquer serviços.	É preferível o uso de <i>drive-tests</i> , pois do lado da rede podem não ser registadas todas as tentativas de estabelecimento
<i>RRC Connection Establishment Success Ratio</i>	Razão entre conexões <i>RRC</i> bem-sucedidas e todas as tentativas efetuadas.	Rejeição: Caso a QoS das conexões anteriores não seja cumprida com o estabelecimento de novas. Falha: potência de sinal baixa; alta interferência; problemas no acesso aleatório.	O <i>UE</i> mantém-se no estado <i>Idle</i> sem acesso ao serviço pretendido.	
<i>Random Access Process Success Ratio</i>	Razão entre acessos aleatórios bem-sucedidos e todos os acessos aleatórios.	Falha: Cobertura insuficiente; nível de interferência elevado; problemas de mobilidade; alocação de recursos inadequada; parâmetros dos acessos aleatórios inadequados.	Pode levar a falhas no restabelecimento de conexões <i>RRC</i> ; falhas de <i>handover</i> .	
<i>Default EPS Bearer Establishment Success Ratio</i>	Razão entre a atribuição bem-sucedida da portadora <i>EPS</i> por defeito e do número total de atribuições da	Rejeição: recursos insuficientes. Falha: problemas no acesso aleatório; cobertura deficiente;	Como a portadora <i>EPS</i> não é atribuída o utilizador não tem endereço <i>IP</i> nem conexão com o <i>P-GW</i> .	

Figura 21 – KPI's definidos para a categoria *Acessibilidade* (CARRASCO, 2011).

Key Performance Indicators	Descrição	Problemas típicos	Efeitos dos problemas	Medição
<i>Number of Radio Link Failures</i>	Contabiliza o número de vezes que existe uma falha na ligação rádio dependendo dos parâmetros especificados.	Baixo nível de sinal <i>RSRQ</i> ; nível de sinal <i>RSRP</i> baixo; interferência elevada; problemas no acesso aleatório; inexistência de vizinhas.	O estado do <i>UE</i> passa para <i>idle</i> e o fluxo de dados é interrompido.	Através de <i>drive-tests</i> ou pelas estatísticas de rede.
<i>EPS Bearer Cut-Off Ratio</i>	Razão entre o número de portadoras <i>EPS</i> desativadas sem pedido explícito e a totalidade de portadoras <i>EPS</i> atribuídas.	Desativação: reativação da portadora; erros na rede.	Quando a portadora dedicada é desativada o <i>UE</i> deixa de ter acesso ao serviço.	

Figura 22 – KPI's definidos para a categoria *Retenção* (CARRASCO, 2011).

bilidade do UE está o processo de *handover*, extremamente importante para um sistema de comunicação móvel. São feitas medições com o objetivo de verificar qual a percentagem de tentativas de *handover* que obtiveram sucesso dentre o total de solicitações. Um pro-

Key Performance Indicators	Descrição	Problemas típicos	Efeitos dos problemas	Medição
Cell Availability	Percentagem de tempo que uma célula permite acesso rádio mínimo pelo tempo de medição definido.	Falhas de energia, problemas nos equipamentos.	Impossibilidade de oferecer serviço: quebras na facturação e na satisfação geral.	Pode ser medido por <i>drive-tests</i> ou pelas estatísticas da rede.
Network Availability	Percentagem de tempo que um agregado de células permite acesso rádio pelo tempo de medição definido.	Falhas de energia, problemas nos equipamentos.	Impossibilidade de oferecer serviço: quebras na faturação e na satisfação geral.	Pode ser medido por <i>drive-tests</i> no entanto tendo em conta que se considera um agregado de células é mais prático pelas estatísticas de rede.

Figura 23 – KPI's definidos para a categoria *Disponibilidade* (CARRASCO, 2011).

cesso de *handover* mal sucedido acarreta interrupção do serviço, seja este uma chamada ou transferência de dados. Consequentemente o QoS do sistema é afetado. Estão mostrados na Fig. 24 os indicadores definidos no quesito mobilidade, levando em consideração origens distintas da quebra de comunicação.

Existem dois tipos de *handover* dentro de um sistema de telecomunicação e estes são: *soft handover* e *hard handover*, na primeira situação, quando o UE solicita troca de estação, o *eNodeB* de origem se mantém conectado ao UE mesmo após realizada a transferência para o *eNodeB* alvo, conservando sua conexão caso haja algum problema e esse UE necessite retornar ao *eNodeB* de origem. No caso do *hard handover* isso não ocorre, assim que a estação alvo aloca os recursos para o UE, o *eNodeB* de origem encerra a conexão e desaloca seus recursos para serem utilizados com outro usuário. Caso haja algum problema com a nova conexão e o UE necessite voltar (efeito ping-pong), o UE terá sua conexão interrompida pois não existirá a ligação com a estação de origem.

#### 4.2.5 Integridade

Categoria que possui maior quantidade de indicadores, permite avaliar a qualidade do serviço de chamadas e dados, pois aborda transferência de pacotes IP. Débitos binários elevados, latência na entrega de pacotes baixa são fatores que influenciam na qualidade da chamada, afetando diretamente na satisfação do cliente. Os indicadores desenvolvidos para testar a integridade da rede móvel permite conhecer a qualidade das ligações efetuadas, se houver qualquer problema o operador se encarregará de apresentar soluções para melhoria do serviço. Na Figura 25 e 26 temos os indicadores definidos pelo 3GPP. Não foi mencionado, mas caso o sistema trabalhe nos modos MIMO 4, 5 e 6, devemos contabilizar o PMI (*Precoding Matrix Indicator*) como indicador de performance (3GPP, 2009b).

Key Performance Indicators	Descrição	Problemas típicos	Efeitos dos problemas	Medição
<i>Number of Handovers</i>	Contabiliza o número de <i>intra</i> e de <i>inter handovers</i> .	A quantidade de <i>handovers</i> depende de: Área das células, nível de sinal, mobilidade, parâmetros de <i>handover</i> .	Como no <i>LTE</i> apenas existem <i>hard handovers</i> , chegada dos pacotes ao novo destino pode provocar atrasos afetando o <i>QoS</i> dos serviços. Além do mais, os <i>handovers</i> consomem recursos de sinalização.	Pode ser medido por <i>drive-tests</i> ou pelas estatísticas da rede.
<i>Ping-Pong Handover Ratio</i>	A razão entre <i>handovers</i> “ping-pong” de células adjacentes e o número total de <i>handovers</i> .	O número elevado deve-se usualmente a um processo de <i>handover</i> demasiado rápido, falta de uma célula dominante e listas de vizinhas ineficazes.	De evitar pois não trazem nenhuma vantagem e consomem recursos de sinalização.	
<i>Time In the Best Cell</i>	Definido como a percentagem de tempo que o <i>UE</i> se encontra na célula com melhor <i>RSRP</i> .	Se o processo de <i>handover</i> for moroso ou a mobilidade for elevada este valor torna-se baixo.	Tempos baixos identificam utilizadores que estão ligados mais tempo a <i>eNB's</i> com um <i>path-loss</i> maior, levando ao aumento da interferência na rede.	
<i>Intra-LTE Handover Success Ratio</i>	Razão entre o número de <i>intra-handovers</i> e o número de <i>handovers</i> total.	Percentagem baixa: rejeição pelo controlo de admissão e congestão devido a uma carga elevada; medidas e comando para <i>handover</i> podem falhar devido a uma baixa qualidade de sinal; <i>timer</i> de <i>handover</i> chega ao fim antes de existir conexão.	Falha nos <i>handovers</i> pode levar a um decréscimo da qualidade de sinal e à queda de ligação se o nível de sinal continuar a piorar.	
<i>Handover Delay (Detach Delay)</i>	Contabiliza o tempo que o <i>UE</i> não está conectado à rede durante o processo de <i>handover</i> .	O atraso depende tipicamente de problemas no acesso aleatório.	Quanto maior a interrupção da ligação maior a degradação do <i>QoS</i> .	

Figura 24 – KPI's definidos para a categoria *Mobilidade* (CARRASCO, 2011).



Key Performance Indicators	Descrição	Problemas típicos	Efeitos dos problemas	Medição
<i>RSRP Level of the Best Available Cell</i>	Nível do sinal <i>RSRP</i> da célula com o valor mais elevado.	Baixo nível de sinal <i>RSRP</i> : número de células na rede insuficiente; posição das antenas; ambiente de propagação.	Falhas nas ligações rádio; problemas de <i>handovers</i> ; <i>throughputs</i> baixos e inexistência de serviço.	Através de <i>drive-tests</i> com <i>scanner</i> ou com <i>UE</i> . É possível à rede pedir as medidas feitas no <i>UE</i> mas localização das mesmas é bastante imprecisa.
<i>RSRQ Level of the Best Available Cell</i>	Nível do sinal <i>RSRQ</i> da célula com o valor mais elevado.	Baixo nível de sinal <i>RSRQ</i> : nível de sinal <i>RSRP</i> baixo; interferência elevada.	Um nível baixo do sinal <i>RSRQ</i> cria problemas semelhantes a um baixo nível de sinal <i>RSRP</i> .	Feito da mesma forma que o sinal <i>RSRP</i> .
<i>SINR Level of the Serving Cell</i>	Relação sinal ruído mais interferência obtida por <i>TTI</i> ou média.	<i>SINR</i> baixa: má cobertura e/ou interferência elevada.	Uma <i>SINR</i> baixa reflete-se diretamente no débito binário oferecido podendo levar a problemas na ligação.	Através de <i>drive-tests</i> para o <i>downlink</i> e das estatísticas de rede em <i>uplink</i> .
<i>BLER Level of the Serving Cell</i>	Relação entre o número de blocos errados e o número total de pacotes transmitidos.	<i>BLER</i> elevada: baixa qualidade de sinal; problemas nos equipamentos.	Taxa de erros elevada: aumento das retransmissões; latência elevada; débitos binários baixos.	Através de <i>drive-tests</i> para o <i>downlink</i> e das estatísticas de rede em <i>uplink</i> .
<i>CQI Index of the Serving Cell</i>	Indicador da qualidade do canal reportado pelo <i>UE</i> .	Apresenta um comportamento semelhante ao da <i>SINR</i> . Podendo ser usado para despiste de problemas.	Valores de <i>CQI</i> baixos: também débitos baixos.	Através de <i>drive-tests</i> ou das estatísticas de rede. Através de <i>drive-tests</i> ou das estatísticas de rede. Através de <i>drive-tests</i> ou pelas estatísticas de rede.
<i>RI of the Serving Cell</i>	Indicador com o número de camadas espaciais suportadas na transmissão.	Se <i>RI</i> se mantiver durante demasiado tempo a 1: pode indicar desperdício de capacidade pois apenas se utiliza um domínio espacial.		
<i>Number of RRC Connection Establishments and Active RRC Connections</i>	Contabiliza as mudanças de estado de <i>idle</i> para <i>connected</i> e as conexões ativas.	Utilizadores que realizam tráfego constantemente e sempre conectados: número elevado de conexões ativas e baixo de novas conexões. Utilizadores esporádicos: número elevado de conexões ativas e baixo de tentativas.	Um número elevado de novas conexões pode causar atraso/falha nos acessos aleatórios ou falhas no estabelecimento de conexões <i>RRC</i> . Caso as conexões ativas excedam limite do <i>eNB</i> o <i>QoS</i> degrada-se para alguns utilizadores.	

Figura 25 – KPI's definidos para a categoria *Integridade* (CARRASCO, 2011).



<b>Cell-Specific Load</b>	Definida como a razão entre o número de recursos alocados e o número total.	Carga da célula elevada: grande número de utilizadores; tipos de serviço exigentes; más condições rádio por utilizador.	Controlo de admissão rejeita novas ligações, diminui a qualidade das existentes ou pode cancelar alguma das ligações ativas.	A carga da célula é obtida pelas estatísticas da rede.
<b>Throughput</b>	Débito binário por utilizador, de uma célula em particular ou de toda a rede.	Débito binário baixo pode dever-se a: Má qualidade de sinal, carga elevada na rede, características do terminal, restrições impostas, problemas de mobilidade, <i>backbone</i> da rede com baixa capacidade ou apenas por pouca utilização dos recursos.	Um débito binário mais baixo que o pretendido é imediatamente perceptível pelo utilizador refletindo-se na <i>QoS</i> . O débito binário da rede é uma importante métrica para avaliação do desempenho geral.	O débito binário do utilizador pode ser obtido através de <i>drive-tests</i> ou pelas estatísticas da rede. O tráfego das células apenas pode ser obtido pelas estatísticas.
<b>Modulation and Coding Scheme</b>	As modulações e codificações ( <i>MCS</i> ) utilizadas.	<i>MCS</i> de baixa ordem: baixa <i>SINR</i> no recetor; problemas de mobilidade podem afetar negativamente a <i>SINR</i> .	A <i>MCS</i> usada tem um impacto direto no <i>throughput</i> . Modulações de baixa ordem não oferecem débitos binários elevados.	Podem ser obtidas por <i>drive-tests</i> ou pelas estatísticas de rede.
<b>User Plane Latency</b>	A latência no plano do utilizador é definida usualmente como o <i>RTT</i> .	Latência elevada pode ter origem em seis pontos: -Processamento ( <i>UE</i> e <i>eNB</i> ); -Transmissão ( <i>downlink</i> e <i>uplink</i> ); -Escalonamento (pedido e admissão); -Retransmissão; -Core da rede; -Localização do <i>P-GW</i> .	A latência elevada afeta particularmente os serviços de tempo real com condições exigentes, afetando a qualidade de serviço.	O <i>RTT</i> pode ser medido através de <i>drive-tests</i> .

Figura 26 – Continuidade dos KPI's definidos para a categoria *Integridade* (CARRASCO, 2011).



## 5 Procedimento Experimental

### 5.1 Introdução ao Simulador

A parte experimental deste trabalho está ligada com a utilização de simuladores, especificamente o simulador desenvolvido pela Universidade de Vienna. Trata-se de um *software* escrito em *MATLAB* e *open source*, este simulador contém entre diversos arquivos, funcionalidades sistêmicas do LTE implementados tais como: escalonadores de pacotes de dados, tipos e configurações de antenas, modos de trabalho em multi-usuário (MIMO), etc. Todas as funcionalidades estão a disposição e o simulador pode ser baixado através do endereço (<https://www.nt.tuwien.ac.at/downloads/>).

O simulador possui manual disponibilizado juntamente com os arquivos do programa, o que facilita seu aprendizado e familiaridade. As configurações são inseridas através de um *script* onde é possível selecionar diversos parâmetros da rede que desejamos simular.

No decorrer da simulação se espera encontrar curvas onde possamos obter informações sobre o comportamento da rede segundo alguns parâmetros que definirmos. Alguns parâmetros que podem ser configurados são(IKUNO; WRULICH; RUPP, 2010):

- Número de usuários por células;
- Quantidade de antenas de transmissão e recepção;
- Tipos de antenas e configuração (3 setores, 6 setores, 3 setores com femtocélulas, etc);
- Frequência de operação da rede;

Esses foram alguns dos parâmetros que podemos configurar no modo de simulação. Existem outros no qual espera-se utilizar no decorrer da seção para chegarmos ao nosso objetivo que consiste no estudo de caso referente a cidade de Brasília durante eventos esportivos onde haja sobrecarregamento da rede. Resolveu-se dividir o processo de simulação em partes, simulando dois cenários semelhantes, alterando-se parâmetros que podem ser úteis no aumento do desempenho da rede, cruzar os dados e retirar informações que auxiliem na busca por soluções de melhora de desempenho.

A primeira simulação foi realizada utilizando parâmetros padrões do simulador, buscando entender o que este *software* poderia fornecer de dados para o trabalho. Alguns parâmetros que estavam definidos foram:

- Escolha do número de setores por antena (*tri sector*, *six sector*, *tri sector plus femtocells*, etc);
- Número de antenas de transmissão (TX) e recepção (RX);
- Modos de transmissão (aqueles citados na subseção MIMO do texto);
- Quantidade de UE's por células;

O simulador disponibiliza um mapa como mostrado na Fig. 27 com dimensões de 2x2Km onde os *eNodeB*'s são colocados de forma a gerar células hexagonais.

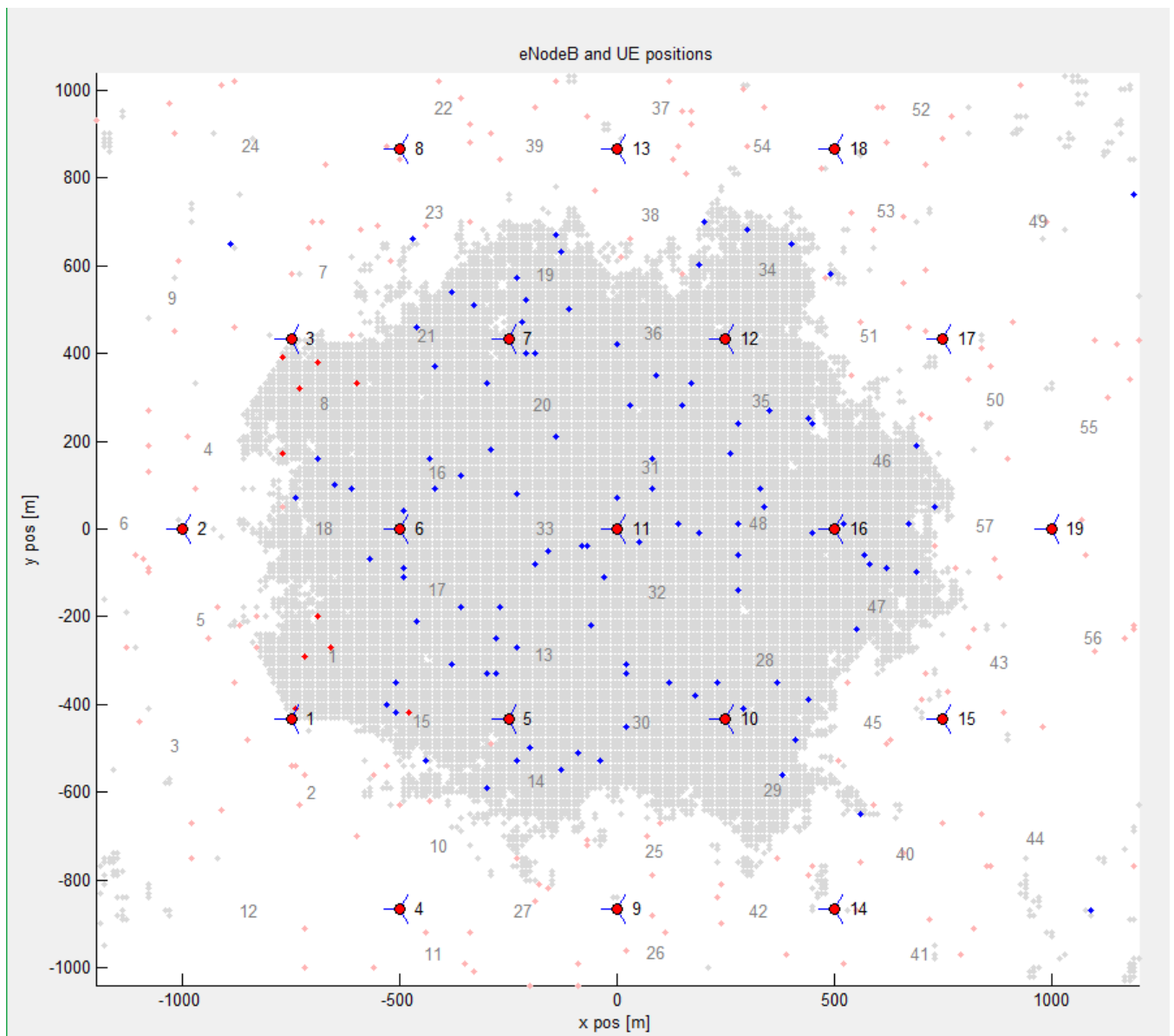


Figura 27 – Mapa com distribuição dos *eNodeB*'s e UE's.

Neste caso utilizaram-se antenas três setores, cada uma espaçada em 120 graus, o número de equipamentos conectados em cada célula foi definido em 5 e sistema SISO

de transmissão. Selecionando a área que desejamos visualizar (marcada em cinza) o que obtivemos de informação com relação a esse procedimento foram os seguintes parâmetros e seus valores:

- Número de UE's na área demarcada = 115;
- *Throughput* médio por unidade móvel = 7.09 Mb/s;
- Eficiência espectral média por UE = 1.94 bit/cu;
- Quantidade de blocos de recurso por intervalo de tempo de transmissão por unidade móvel RBs/TTI/UE = 19.85 RBs.

Outros resultados gerados pelo simulador baseado na mesma configuração anterior é o resultado agregado, considerando todas as células selecionadas anteriormente. Nessa parte observa-se a seguinte configuração mostrada:

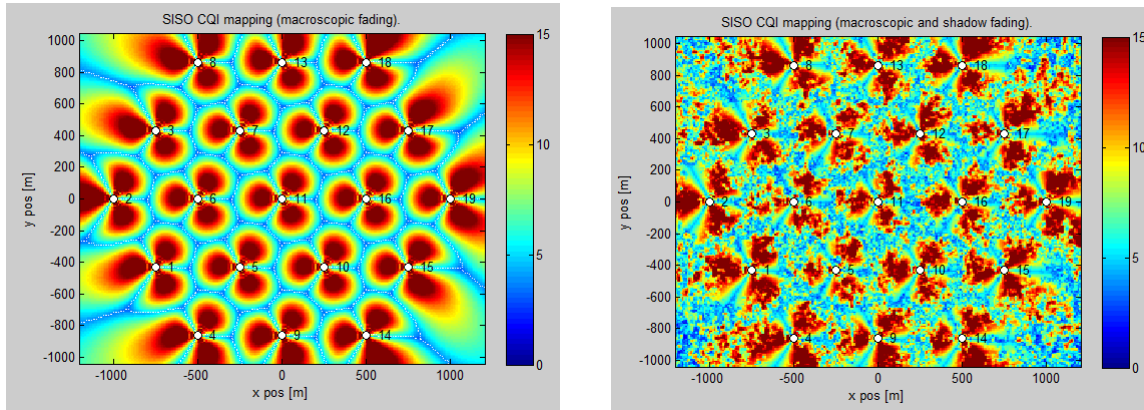
- Número de células selecionadas = 23;
- Número de UE's existentes nessas células = 115;
- Escalonador utilizado = *Proportional fair sun*;
- Antenas TX e RX = 1;
- Modo de transmissão SISO.

As estatísticas das células foram:

- Pico de *throughput* = 19.68 Mb/s;
- *Throughput* médio por UE = 7.09 Mb/s;
- *Throughput* médio por célula = 35.46 Mb/s;
- Porcentagem de ocupação dos blocos de recurso = 93.43%.

Através da simulação, como mostrado na Figura 28 verifica-se o comportamento de um dos parâmetros de qualidade, neste caso, o valor do CQI é visto em uma escala de 0 até 15 onde o valor indica em ordem crescente da qualidade do canal de transmissão. Como anteriormente mencionado esse parâmetro é fundamental para os *eNodeB*'s escolherem esquemas de modulação, transmissão e outras configurações buscando melhorar o desempenho do sistema.

A Figura 28a mostra como a qualidade do canal por meio do valor do CQI varia principalmente ao longo da distância até o *eNodeB*, nesse caso temos um efeito atenuante



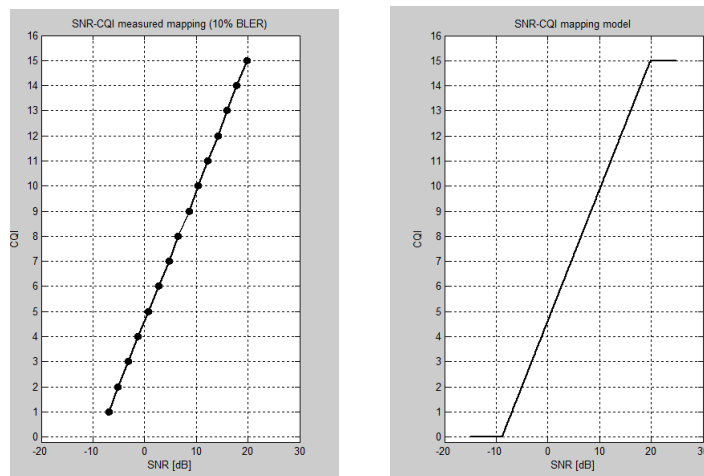
(a) Propagação considerando apenas efeito de *fading*.

(b) Propagação considerando *fading* e *shadowing*.

Figura 28 – Exemplo de propagação do sinal emitido pelos *eNodeB*'s considerando apenas o efeito de *fading* em (a) e em (b) considerando também efeito de *shadowing*.

de certo modo homogêneo diferentemente da Figura 28b onde se tem, além do efeito da distância, atenuações e uma maior degradação do sinal proporcionada pelos objetos encontrados durante o percurso. Essa ilustração é muito importante pois mostra como a simulação acaba se tornando mais real quando inserimos uma maior quantidade de modelos dentro do sistema.

Ainda interessados no comportamento do CQI durante a simulação, extraiu-se uma curva de mapeamento deste indicador para determinado valor da relação sinal/ruído considerando uma taxa de erro de blocos com valor de 10% mostrado na Figura 29a. O resultado é comparado com a Figura 29b que é a curva proposta pelo modelo matemático.

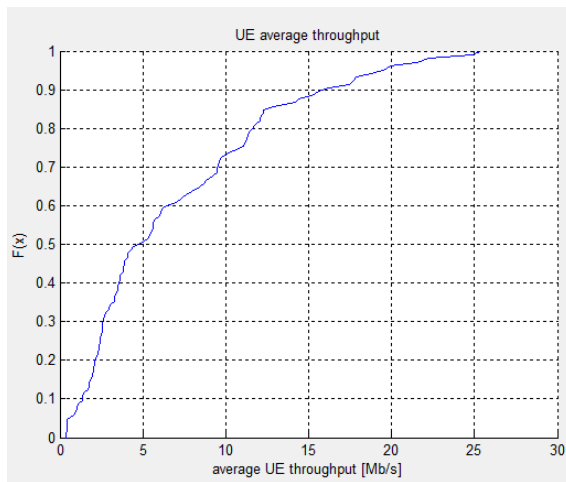


(a) Mapeamento do CQI pela relação SNR dos valores simulados.

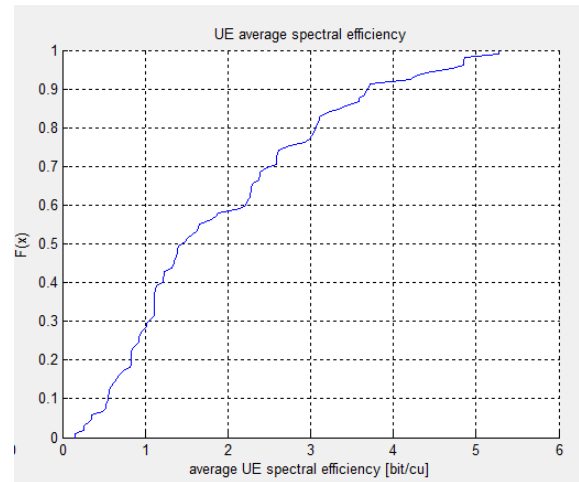
(b) Curva esperada para o mapeamento do CQI através de modelos matemáticos.

Figura 29 – Gráfico do mapeamento do indicador de qualidade de canal dependendo do valor da relação sinal/ruído.

Ainda na Figura 29a temos que quanto maior a relação sinal/ruído do UE, maior será o seu índice de qualidade de canal. Com isso o UE passa a receber da *eNodeB* uma maior quantidade de dados (*throughput* elevado) e consequentemente maior satisfação do cliente. Podemos avaliar através dos dois gráficos que seguem na Figura 30 o comportamento do *throughput* médio do conjunto de células que foram selecionadas com relação a quantidade de pessoas que estão abaixo ou acima de um determinado valor e um outro gráfico mostrando a eficiência da densidade espectral média.



(a) Quantidade de usuários e *throughput* médio do conjunto de células.



(b) Quantidade de usuários e densidade espectral média.

Figura 30 – Gráfico cumulativo da quantidade de usuários pelo valor de *throughput* médio e eficiência espectral média.

As imagens obtidas e mostradas na Figura 30 tem características cumulativas, ou seja, quando pegamos um ponto no eixo  $x$ , seu equivalente no eixo  $y$  mostra a quantidade em porcentagem de usuários que se encontram abaixo daquele valor selecionado como parâmetro.

## 5.2 Simulação do estudo de caso

No estudo de caso proposto para simulação tenta-se chegar o mais próximo do ambiente em que ocorrerão os jogos durante o evento esportivo da copa do mundo FIFA 2014. Utilizando o máximo de informações e parâmetros possíveis para aproximar de um cenário contendo o estádio e os usuários de serviço móvel acessando a rede em diversos serviços. Para entendermos a região onde está localizado o estádio nacional temos a Figura 31 que ilustra o espaço aberto em que se encontra a construção, isso facilita a propagação do sinal das antenas distribuídas pela região próxima e evita degradação do sinal durante seu trajeto.





Figura 31 – Vista do estádio nacional de Brasília e área ao redor, imagem retirada do site da FIFA: [www.fifa.com/worldcup/destination/stadiums/stadium=5002284/](http://www.fifa.com/worldcup/destination/stadiums/stadium=5002284/) acessado no dia 28/05/2014.

A primeira simulação consiste no comportamento de carga do sistema, diversas simulações considerando um número crescente de usuários por célula de onde retiramos parâmetros como:

- percentual de UE que possuem *throughput* acima de 3Mb/s;
- percentual de UE que possuem *throughput* acima de 5Mb/s;
- *throughput* médio por usuário;
- *throughput* médio por célula;
- percentual de ocupação dos blocos de recursos.

O mapa considerado para a simulação está mostrado na Figura 32, a região de estudo considerada para obtenção dos dados é a que está demarcada em cinza. Essa região possui dimensões aproximadas de 1500x1500m ou 2.250.000 metros quadrados, tem-se que o estádio nacional de Brasília possui no total de sua área construída 214 mil metros quadrados segundo o site oficial (<http://www.portal2014.org.br/andamento-obras/8/Mane+Garrincha.htm>), então a cobertura de estudo contempla região ocupada pela construção e podendo ser utilizada na simulação.

A Tabela 7 mostra informações obtidas pela simulação, valores de *throughput* médio, porcentagem de usuários que possuem *throughput* acima de 3 e 5Mb/s, etc. Parâmetros de ocupação dos blocos de recursos e *throughput* médio das células são essenciais quando queremos saber o desempenho do sistema mediante a situação de sobrecarga e por isso foram coletados.



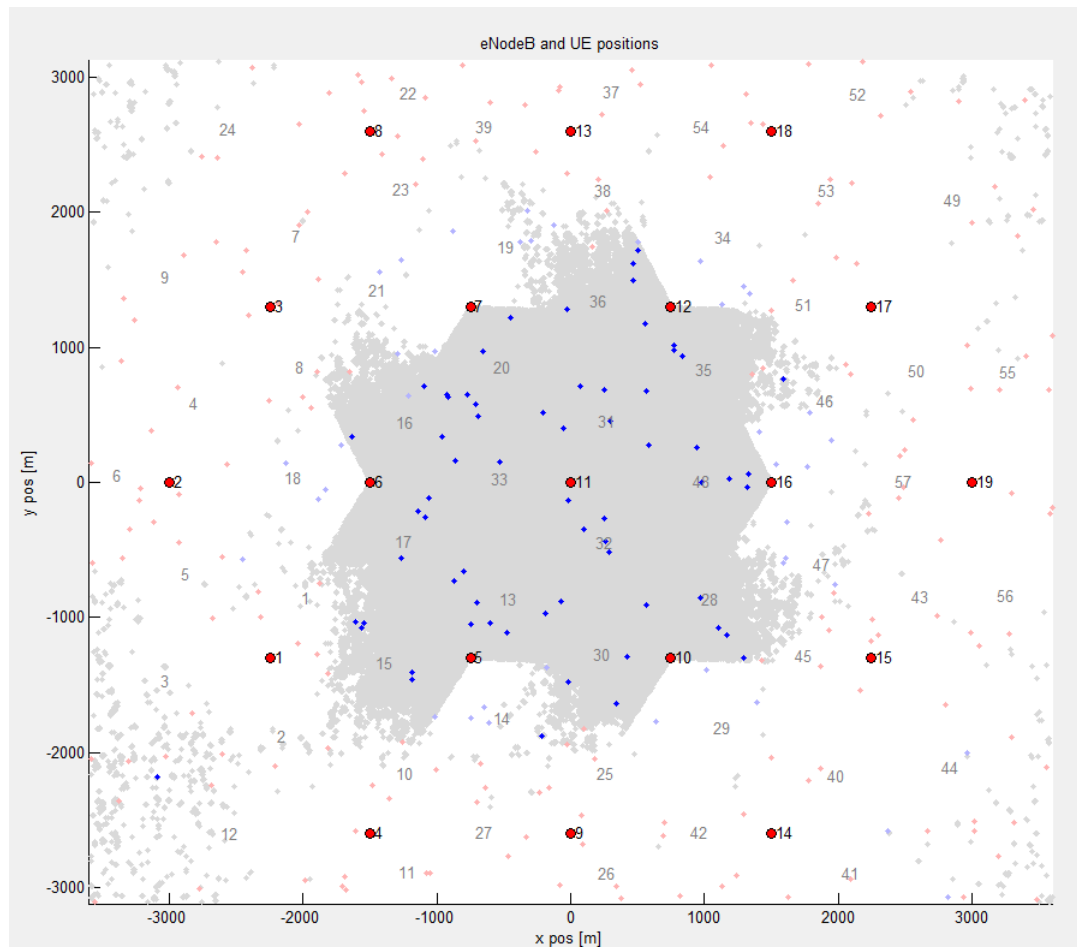


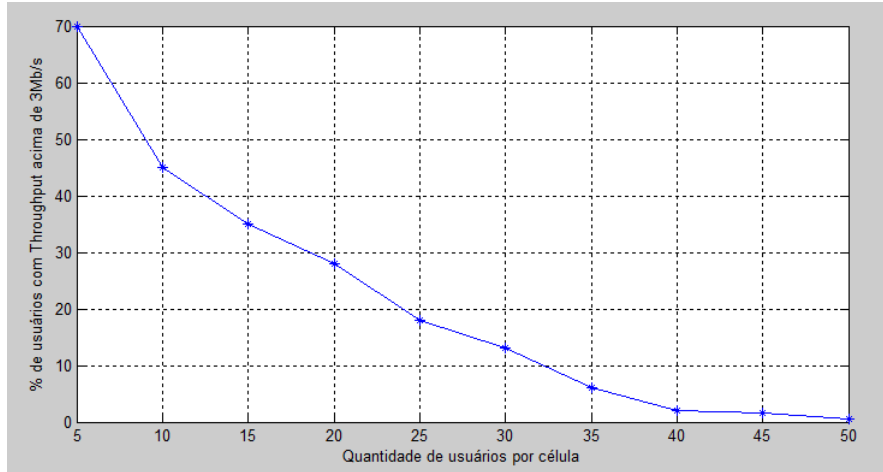
Figura 32 – Área em cinza representa a região de estudos de onde sairão os dados de tráfego.

Qunatidade de UE's	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Throughput médio (Mb/s)	7.43	3.98	2.59	2.01	1.58	1.24	1.08	0.93	0.85	0.74
% de UE Acima de 3Mb/s	70	45	35	28	18	13	6	2	1.5	0.5
% de UE Acima de 5Mb/s	43	30	20	8	5	2	0.5	0	0	0
% de ocupação dos RB's	95.8	99.75	97.86	97.28	98.73	98.45	99.53	98.75	99.13	99.44
Throughput médio das células (Mb/s)	39.99	39.79	38.81	42.25	39.39	37.10	37.73	37	38.19	36.98

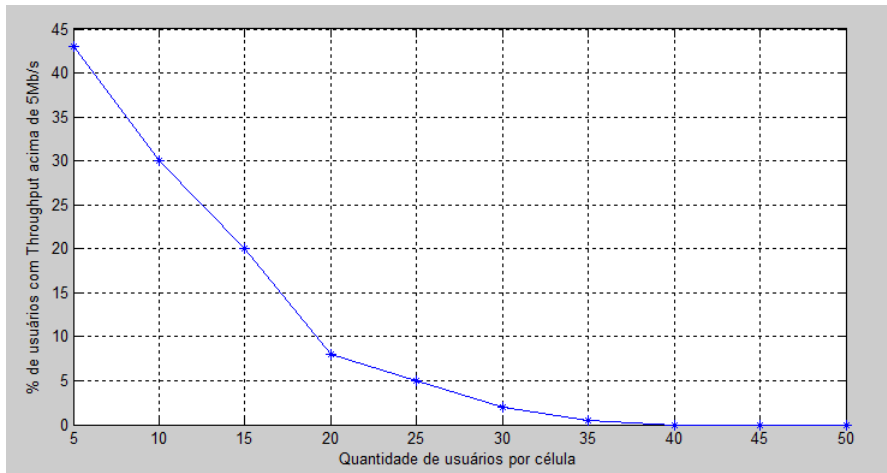
Tabela 7 – Tabela da simulação para o comportamento de carga do sistema LTE para diversas quantidades de usuários por célula. Valores de *throughput* médio por UE e taxa de ocupação dos blocos de recursos estão mostrados dentre outros.

Dos resultados mostrados na Tabela 7 podemos tirar informações e gerar alguns gráficos importantes como mostrados na Fig. 33 e 34 e com isso propor possíveis mudanças para melhoria da qualidade de transmissão.

Através das Figuras 33a e 33b podemos ver que a taxa de transmissão cai abruptamente com o aumento do número de UE's conectados à célula, algumas estratégias podem ser adotadas para dar robustez ao sistema proporcionar maior capacidade da rede. Uma



(a) Comportamento de carga do sistema com parâmetro fixo em 3Mb/s.



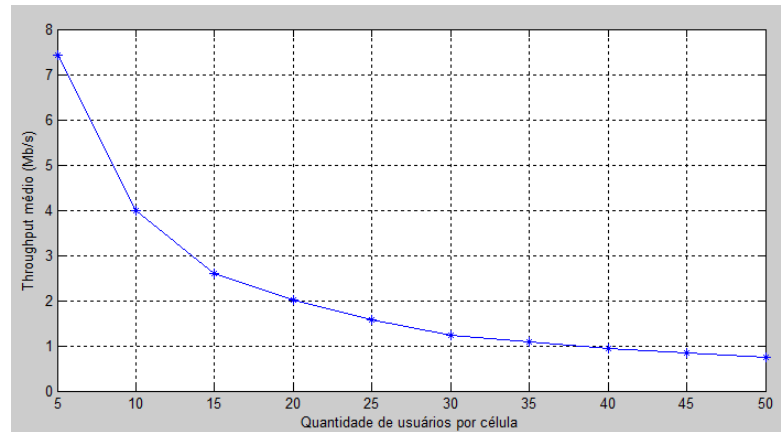
(b) Comportamento de carga do sistema com parâmetro fixo em 5Mb/s.

Figura 33 – Comportamento de carga do sistema, porcentagem de usuários com *throughput* superior a 3MB/s em 33a e 5Mb/s em 33b.

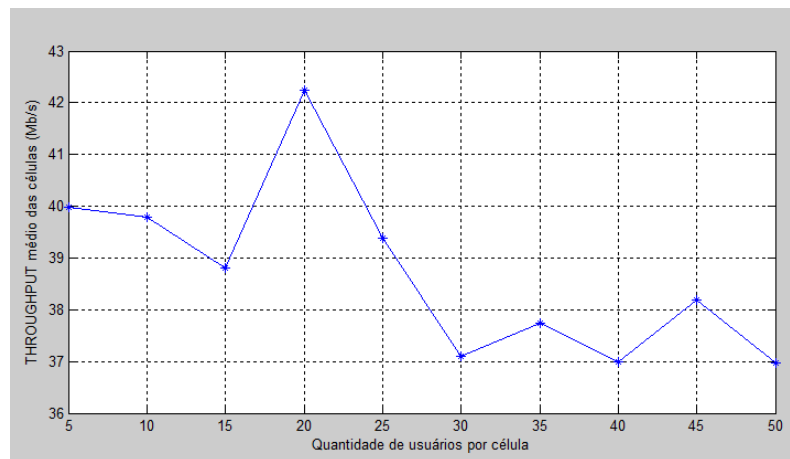
dessas possíveis soluções será mostrada na subseção seguinte e diz respeito a instalação de femtocélulas, aparelhos semelhantes aos roteadores *Wi-fi* que ajudam principalmente no escoamento de carga das macroestações celulares. Quanto ao comportamento de carga observando o *throughput* médio por UE e o *throughput* médio por célula estão mostrados na Fig. 34.

O nível de dados recebidos pelo UE cai consideravelmente quando aumentamos a quantidade de equipamentos conectados no sistema, pelo gráfico da Fig. 34a temos um *throughput* médio de 7,43 Mbits/s quando em cada célula se encontram 5 usuários e cai para 0,74 Mbits/s quando multiplicamos esse número de UE's por 10.

Outra informação retirada da simulação foi a porcentagem de ocupação dos blocos de recursos disponíveis em um sistema (uma célula por exemplo), pela Fig. 35 podemos verificar que mesmo variando-se a quantidade de UE's na rede, mantém-se a ocupação em torno de 98%, essa ocupação dos blocos de recursos pode sofrer pequenas variações



(a) *Throughput* médio dos UE's de acordo com a quantidade de usuários presentes na região de interesse.



(b) *Throughput* médio das células de acordo com o número de usuários.

Figura 34 – Comportamento de carga do sistema com relação ao valor médio de *throughput* das células ou recebidos pelos usuários.

dependendo do tipo de escalonador que atua no sistema.

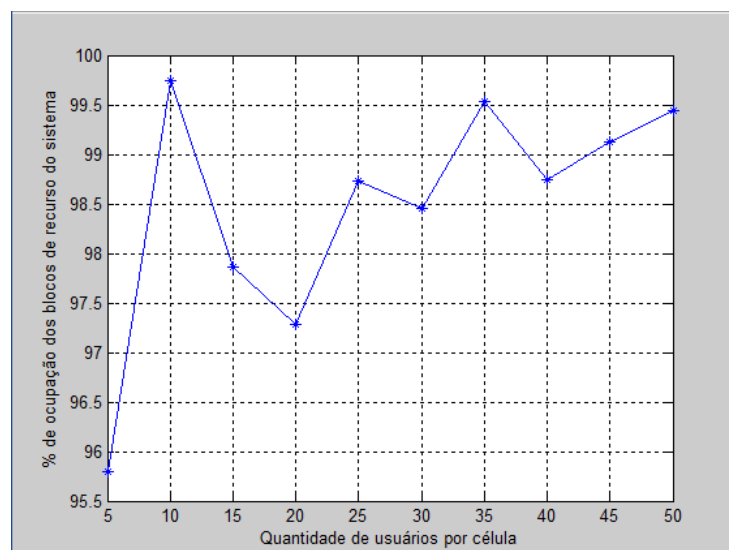


Figura 35 – Características de ocupação dos blocos de recurso disponíveis pelo sistema.

O *script* utilizado na simulação realizada onde obtivemos os dados mostrados nesta seção está mostrado abaixo, nele inserimos parâmetros essenciais utilizados pelo *software* na configuração da rede de transmissão celular.

```

1      %Tipo de simulacao
2 simulation_type = 'tri_sector_tilted';
3 LTE_config = LTE_load_params(simulation_type);
4      %Tipo de debug utilizado
5 LTE_config.debug_level      = 2;
6 LTE_config.show_network    = 3;
7      %Frequencia de trabalho da rede
8 LTE_config.frequency       = 2.5*10^9;
9      % Largura de banda
10 LTE_config.bandwidth      = 20*10^6;
11      %Numero de antenas TX e Numero de antenas Rx
12 LTE_config.nTX            = 1;
13 LTE_config.nRX            = 1;
14 LTE_config.tx_mode        = 1;
15      %Escalonador de pacotes utilizado
16 LTE_config.scheduler      = 'prop fair Sun';
17      %Modelo matematico utilizado para efeito de fading
18 LTE_config.shadow_fading_type = 'claussen';
19      % Tempo de simulacao TTI (Transmission Time Intervals)
20 LTE_config.simulation_time_tti = 10;
21      % Numeros de usuario por celula
22 LTE_config.UE_per_eNodeB    = 10;
23      %Distancia entre eNodeB's
24 LTE_config.inter_eNodeB_distance = 1500;

```

LTEmaintcc.m

Como anteriormente apontado, existem técnicas que podem ser usadas com o objetivo de melhorar a qualidade do sinal e da transferências de dados sem alterar configurações dos *eNodeB's* ou da arquitetura mais interna. Trata-se da inserção de dispositivos semelhantes aos repetidores de sinal ou roteadores que criam células de menor dimensão e área de cobertura do que uma célula normalmente abrange, e por isso são denominadas femtocélulas. Na próxima subseção mostraremos o conceito e simulações utilizando essa tecnologia no sistema.

### 5.2.1 Inserção de Femtocélulas

Femtocélulas são estações rádio-base pessoais, menores dimensões quando comparada as macrocélulas das redes celulares. Podem ser instaladas em ambientes *indoor* (casas, escritórios, etc) ou *outdoor* (estádios, parques, etc), oferecendo melhor cobertura de rede ao usuário. Estão sendo desenvolvidas para dar um salto em desempenho nas redes celulares, pois oferecem taxas de dados aproximadamente iguais às células maiores

e capacidade de usuários elevada. Também ajudam na melhoria da cobertura interna e reduz a carga de tráfego da rede macro.

Algumas das características das femtocélulas em termos de rede são:

- Utilizam espectro licenciado pela reguladora;
- Possuem baixa potência de transmissão (20 - 100mW);
- Baixa área de cobertura (30 - 200m);
- Capacidade de autoconfiguração de otimização.

Obtivemos possíveis soluções que auxiliam o escoamento de dados e diminuição do tráfego de informações pelo *eNodeB*, evitando sobrecarga por parte das macrocélulas dos sistemas de comunicação, no caso de um ambiente com dimensões elevadas, nosso estudo de caso por exemplo, pode-se inserir dezenas ou centenas de femtocélulas que auxiliariam no aumento da qualidade e capacidade da rede.

Para descobrir o quanto se consegue de melhorias na rede quando inserimos femtocélulas, foram realizadas simulações exatamente como as anteriores onde variamos o número de usuários entre 5 e 50, a cada interação acrescentávamos 5 usuários por células e coletavam-se valores de *throughput* médio por UE e célula, % de usuários com *throughput* maiores do que 3 e 5Mbps/s.

O *script* utilizado para esse cenário de simulação está mostrado a seguir, sendo a diferença do caso anterior o tipo de simulação onde escolheu-se antenas com três setores mais femtocélulas.

```

1      %Tipo de simulacao
2 simulation_type = 'six_sector_plus_femtocells';
3 LTE_config = LTE_load_params(simulation_type);
4      %Tipo de debug utilizado
5 LTE_config.debug_level          = 2;
6 LTE_config.show_network        = 3;
7      %Frequencia de trabalho da rede
8 LTE_config.frequency           = 2.5*10^9;
9      % Largura de banda
10 LTE_config.bandwidth           = 20*10^6;
11      %Numero de antenas TX e Numero de antenas Rx
12 LTE_config.nTX                 = 1;
13 LTE_config.nRX                 = 1;
14 LTE_config.tx_mode             = 1;
15      %Escalonador de pacotes utilizado
16 LTE_config.scheduler           = 'prop fair Sun';
17      %Modelo matematico utilizado para efeito de fading
18 LTE_config.shadow_fading_type  = 'claussen';

```

```

19 % Tempo de simulacao TTI (Transmission Time Intervals)
20 LTE_config.simulation_time_tti = 10;
21 % Numeros de usuario por celula
22 LTE_config.UE_per_eNodeB = 10;
23 %Distancia entre eNodeB's
24 LTE_config.inter_eNodeB_distance = 1500;

```

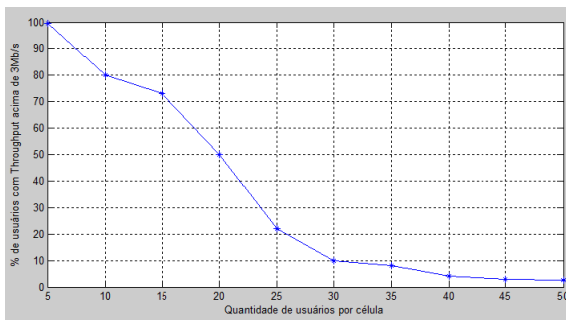
LTEmaintccFemto.m

Nesse novo cenário são inseridas antenas omnidirecionais que irradiam o sinal ao longo de 360 graus e são distribuídas pela região contribuindo na transmissão de dados pela rede. Com os resultados obtidos montou-se a Tab. 8 a seguir.

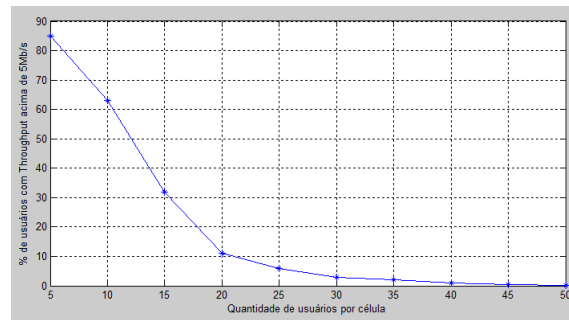
Qunatidade de UE's	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Throughput médio (Mb/s)	12.61	5.73	4.05	2.95	2.48	2.04	1.71	1.52	1.34	1.23
% de UE Acima de 3Mb/s	99.5	80	73	50	22	10	8	4	3	2.5
% de UE Acima de 5Mb/s	85	63	32	11	6	3	2	1	0.5	0.2
Throughput médio das células (Mb/s)	63.06	57.26	60.77	58.95	62.02	61.27	59.74	60.85	60.5	61.52

Tabela 8 – Tabela da simulação para o comportamento de carga do sistema LTE para diversas quantidades de usuários por célula em um sistema com femtocélulas inseridas.

A partir dos dados fornecidos pela Tab. 8 obtemos a Fig. 36a e 36b, se compararmos com os gráficos da Fig. 33 é possível verificar se houve melhorias quanto a porcentagem atendida por um *throughput* de 3 e 5Mb/s ou então compara-se com a Fig. 34 e veremos se obteve-se melhorias de *throughput* por UE individual e célula também.



(a) Comportamento de carga do sistema com parâmetro fixo em 3Mb/s utilizando femtocélulas.

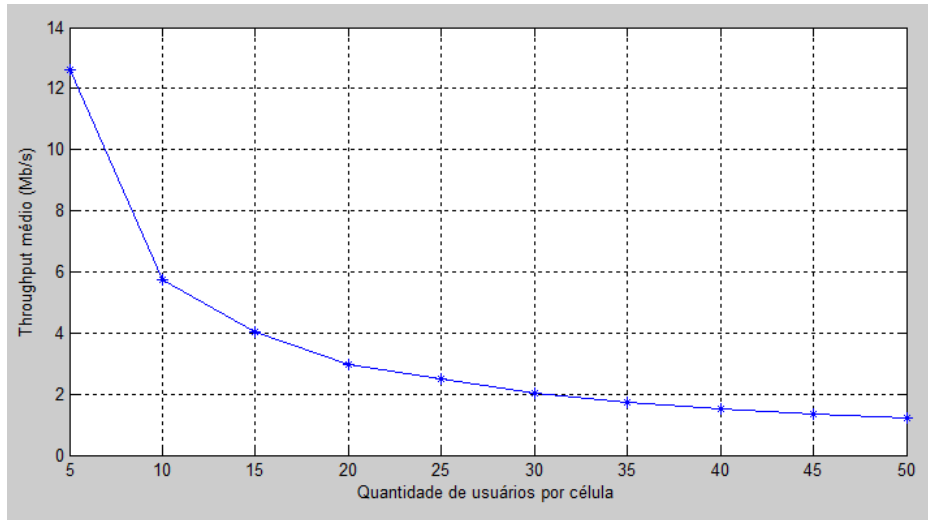


(b) Comportamento de carga do sistema com parâmetro fixo em 5Mb/s utilizando femtocélulas.

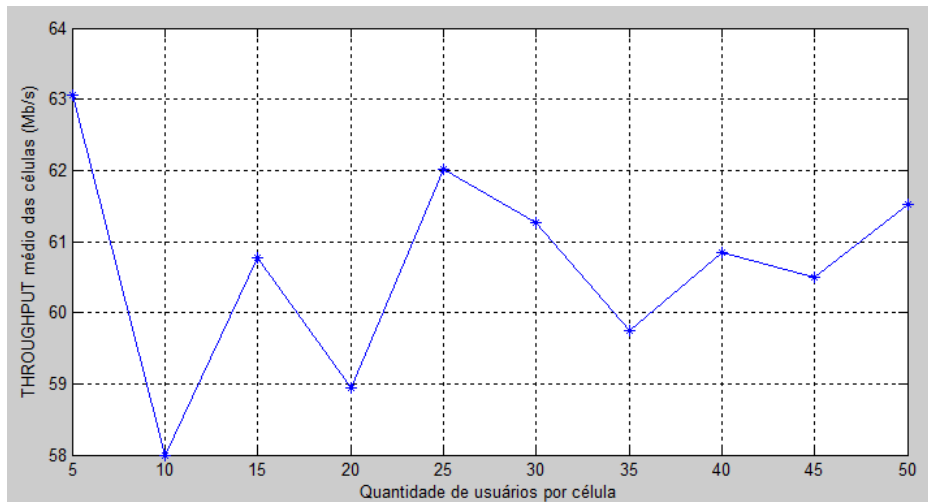
Figura 36 – Comportamento de carga do sistema, porcentagem de usuários com *throughput* superior a 3MB/s em 36a e 5Mb/s em 36b utilizando femtocélulas para escoamento de tráfego.

Exatamente como feito anteriormente, retiramos informações sobre o *throughput* médio por UE e de escoamento médio do conjunto de *eNodeB's* selecionados dentro da nossa região de interesse. Esses dados são mostrados através da Figura 37 onde temos o

comportamento do *throughput* médio do UE e das células considerando a transmissão dos dados relativos às femtocélulas.



(a) *Throughput* médio dos UE's de acordo com a quantidade de usuários presentes na região de interesse para uma rede celular com femtocélulas.



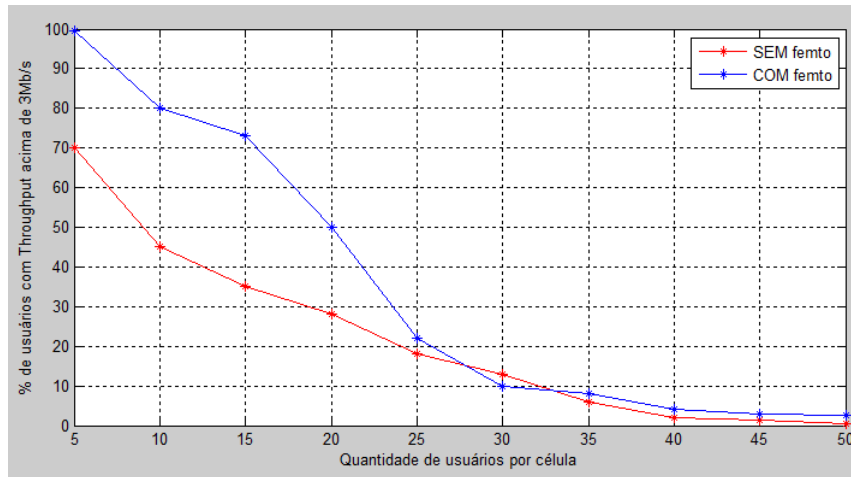
(b) *Throughput* médio das células de acordo com o número de usuários para uma rede celular com femtocélulas.

Figura 37 – Comportamento de carga do sistema utilizando femtocélulas para escoamento de tráfego com relação ao valor médio de *throughput* das células ou recebidos pelos usuários.

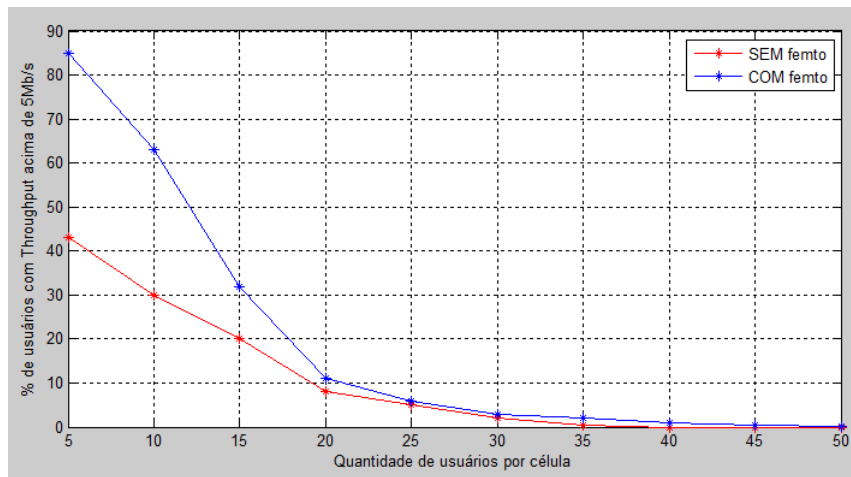
### 5.2.2 Comparação entre os cenários de simulação

Depois de feita as simulações em sistemas com e sem utilização de femtocélulas, geraram-se gráficos comparativos entre o desempenho das duas redes em situações de sobrecarga. Para ilustrar as diferenças medidas comparou-se os gráficos das Figuras 33 e 36 e o resultado foram as Figuras 38a e 38b apresentadas a seguir.

Verificou-se a melhora que as femtocélulas proporcionaram quando foram instaladas, porém essa melhora foi mais considerável para valores de usuários até 20 (vinte) por



(a) Comportamento de carga do sistema com parâmetro fixo em 3Mb/s.



(b) Comportamento de carga do sistema com parâmetro fixo em 5Mb/s.

Figura 38 – Comapração entre sistemas com e sem femtocélulas para a porcentagem de usuários com *throughput* superior a 3Mb/s em 38a e 5Mb/s em 38b.

célula. A partir desse valor o contraste era menor. A Tabela 9 mostra a diferença entre o *throughput* do sistema com femtocélulas e sem femtocélulas.

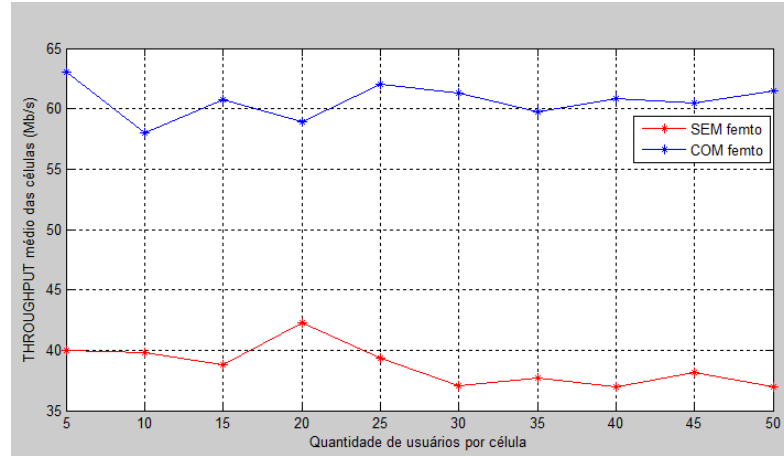
Qunatidade de UE's	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Dif. % de UE Acima de 3Mb/s	29.5	35	38	22	4	-3	2	2	1.5	2
Dif. % de UE Acima de 5Mb/s	42	33	12	3	1	1	1.5	1	0.5	0.1

Tabela 9 – Tabela com valores das diferenças entre a % de usuários acima dos patamares de 3 e 5Mb/s com e sem femtocélulas.

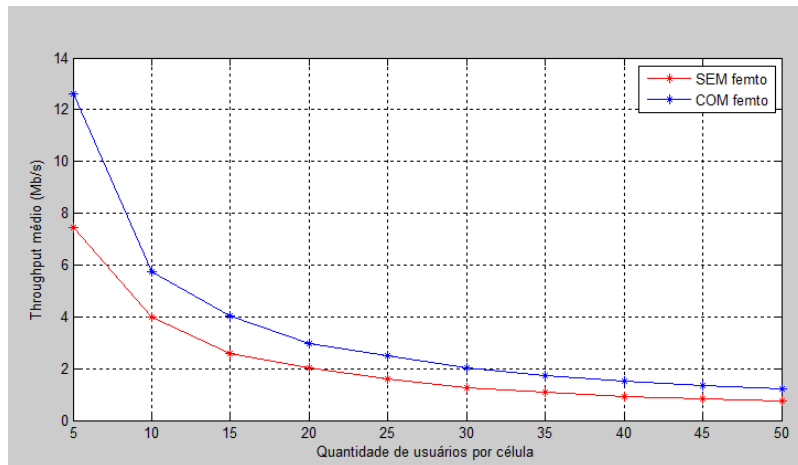
Do mesmo modo fez-se a comparação utilizando os outros dois elementos que estamos analisando, pela Figura 39 observa-se os gráficos comparativos do *throughput* médio por célula e por usuários em um mesmo sistema.

A Tabela 10 é uma compilação com o resultado da diferença entre os valores de *throughput* médio para cada caso nas duas situações estudadas.





(a) Comparação do comportamento de carga entre uma rede com e sem femtocélulas, analisando *throughput* médio das células.



(b) Comparação do comportamento de carga entre uma rede com e sem femtocélulas, analisando *throughput* médio dos UE's.

Figura 39 – Comapração entre sistemas com e sem femtocélulas, análise do *throughput* médio por células 39a e *throughput* médio por UE 39b.

Qunatidade de UE's	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Dif. TP médio por UE	5.18	1.75	1.46	0.94	0.9	0.8	0.63	0.59	0.49	0.49
Dif. TP médio por célula	23.7	18.21	21.96	16.7	22.63	24.17	22.01	23.85	22.31	24.54

Tabela 10 – Tabela com valores das diferenças entre o *throughput* médio por UE e por célula em um sistema com e sem femtocélulas.

Verificou-se que para o *throughput* médio das células a solução proposta ajudou em um aumento médio de 21.94Mb/s por célula enquanto que o mesmo aumento para *throughput* médio do UE foi de 1.32Mb/s sendo essa diferença mais elevada até aproximadamente 20 usuários por célula.

Para definirmos KPI's que permitissem vizualisar o comportamento da rede, utilizamos os dois cenários juntamente com os resultados obtidos para podermos avaliar se esses indicadores poderiam ser confiáveis. A próxima seção descreve a elaboração e com-

portamento dos indicadores sobre o desempenho das redes utilizando femtocélulas e uma rede sem femtocélulas. Espera-se que ao analisarmos os KPI's propostos implementados nos dois cenários desimulação, tenha-se uma melhor resposta quando se insere femtocélulas na rede pois como pôde ser observado através dos dados exibidos nesta subseção o aumento da taxa de dados é elevado se comparado ao sistema sem femtocélulas.

### 5.2.3 Elaboração de indicadores de desempenho

Com o auxílio do *software* e dos dados fornecidos pelas simulações, foram desenvolvidos dois parâmetros que quando combinados possam ser utilizados para medir qualidade da rede. O primeiro KPI sugerido segue seguinte modelo

$$KPI_{híbrido} = 10 * \left( \frac{\alpha * throughput + \beta * CQI}{\alpha * throughput_{MAX} + \beta * CQI_{MAX}} \right), \quad (5.1)$$

o segundo KPI segue o mesmo modelo, porém sua definição é dada por

$$KPI_{célula} = 10 * \left( \frac{\gamma * throughput(células) + \lambda * Ocupação(RB)}{\gamma * throughput(células)_{MAX} + \lambda * Ocupação(RB)_{MAX}} \right), \quad (5.2)$$

onde combinaram-se dois indicadores de performance do quesito *Integridade* para o KPI definido em 5.1 com o valor do *throughput* e CQI ponderados pelos parâmetros *Alpha* ( $\alpha$ ) e *Beta* ( $\beta$ ), dividindo-os pelos mesmos parâmetros só que desta vez utilizamos seus valores máximos obtendo um KPI normalizado. No final teremos um indicador variando entre 0 e 10 onde o menor valor indica que a rede está com o desempenho comprometido e o valor máximo indica um bom funcionamento da rede em termos de qualidade de canal e transmissão de dados entre *eNodeB* e UE.

O segundo KPI apresentado definido pela Eq. 5.2 é direcionado para a avaliação do desempenho da estação base, dependendo da quantidade de bloco de recursos utilizados e também o *throughput* médio por célula ou *eNodeB*. Ponderados por dois parâmetros *Gamma* ( $\gamma$ ) e *Lambda* ( $\lambda$ ) como no indicador anterior e normalizados para obtermos um valor entre 0 e 10. Este segundo KPI indica através de seus valores mínimos e máximos o comportamento do desempenho da estação base.

Dentre os dois KPI's propostos no trabalho, pode-se com a ajuda do simulador verificar o comportamento apenas do segundo indicador, pois o *software* não fornece meios de simular o comportamento do CQI em função do número de usuários conectados na rede. Então deixa-se como sugestão para trabalhos futuros a verificação do comportamento deste KPI proposto.

Utilizando os dados já obtidos anteriormente, calculou-se o  $KPI_{célula}$  em duas situações diferentes, a primeira para o sistema simples, e o segundo para um sistema com femtocélulas. O que se espera ao final é a melhora ou aumento do valor deste KPI

no cenário onde estão inseridas as femtocélulas, devido às melhorias principalmente no aumento do *throughput* médio por célula que elas proporcionam.

O fato de não conhecermos os parâmetros *Gamma* e *Lambda* da Eq. 5.2 fez com que os cálculos fossem realizados considerando três combinações:

- $\gamma = 10, \lambda = 90$ ;
- $\gamma = 50, \lambda = 50$ ;
- $\gamma = 90, \lambda = 10$ .

As Figuras 40, 41 e 42 mostram os resultados obtidos através da simulação e parâmetros fixados em três situações distintas.

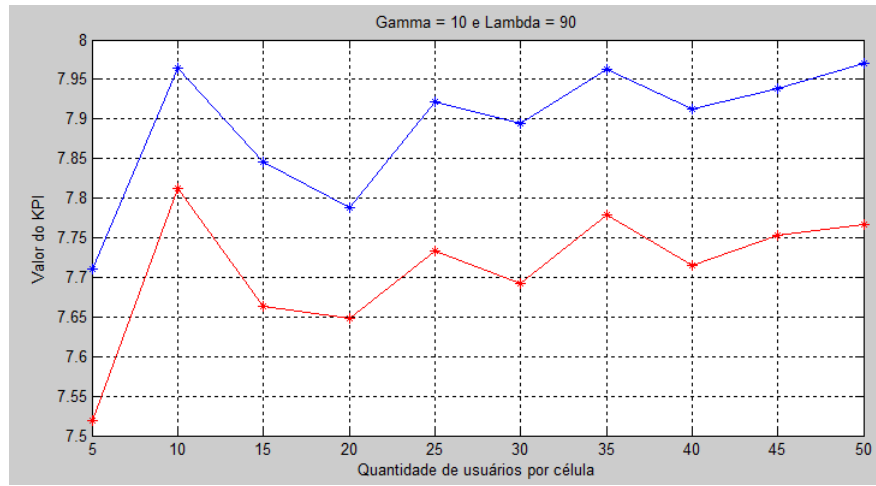


Figura 40 – Comportamento de  $KPI_{célula}$  com parâmetros fixados em  $\gamma = 10, \lambda = 90$ .

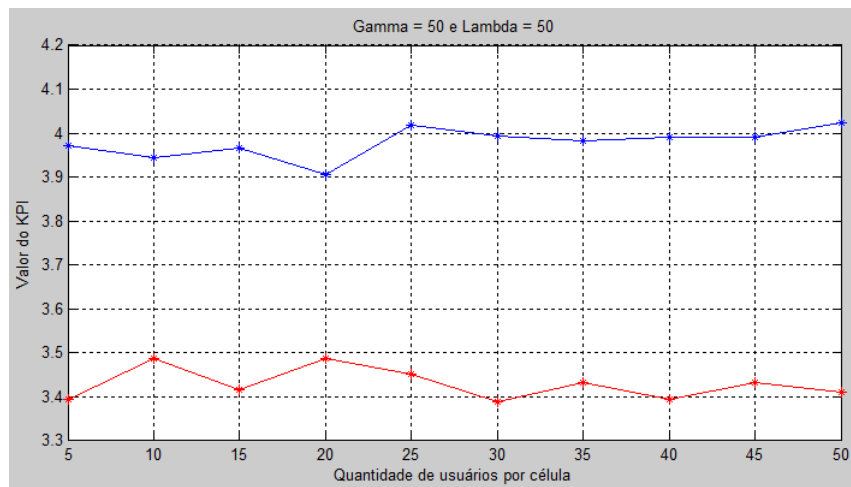


Figura 41 – Comportamento de  $KPI_{célula}$  com parâmetros fixados em  $\gamma = 50, \lambda = 50$ .

Analisando os gráficos obtidos pôde-se verificar que o valor do KPI proposto se eleva quando inserimos femtocélulas no sistema, pois como se pôde notar, há um aumento considerável do *throughput* médio dos *eNodeB*'s.

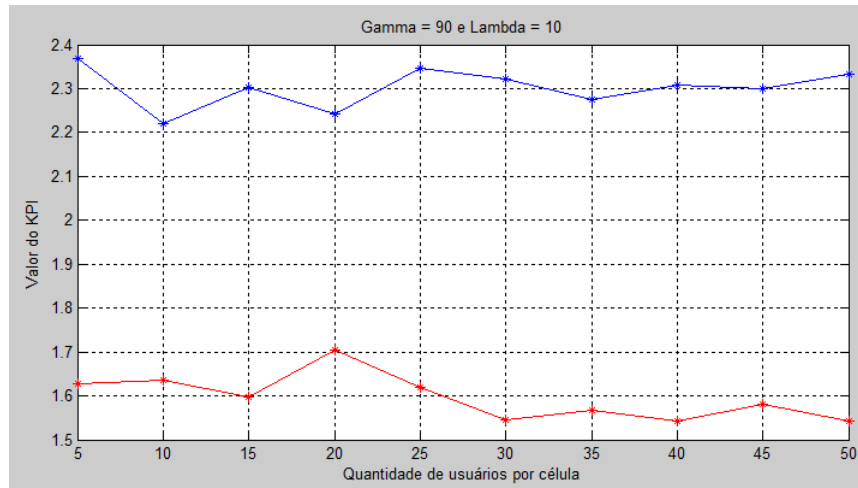


Figura 42 – Comparação e comportamento dos valores do  $KPI_{célula}$  para sistema simples (linha vermelha) e outro utilizando femtocélulas (linha azul).

Outro ponto observado foi de que o segundo parâmetro utilizado no cálculo do KPI sofre pouca variação, pelo menos nas simulações verificou-se que o sistema trabalha com ocupação entre 97% e 100% dos blocos de recursos disponíveis. Então temos que a maior contribuição para a variação do KPI é o *throughput* médio medido por célula. Como esperado anteriormente, ao adicionarmos femtocélulas na rede, conseguimos aumentar a performance do sistema e consequentemente a qualidade de transmissão de dados por parte das células.

## Parte III

### Conclusão e Trabalhos futuros



## 6 Conclusão e Trabalhos futuros

### 6.1 Conclusão

Durante o trabalho tivemos contato com tecnologias desenvolvidas ou aperfeiçoadas para o padrão de telefonia móvel LTE implementado no Brasil. Arquitetura de rede se mostra com diferenças quando comparada às tecnologias anteriores e o fato de ser um serviço baseado em transferência de dados somente via IP faz com que desde o momento de adoção até a instalação de colocação em funcionamento demande um certo tempo.

Outros aspectos estruturais e funcionais do LTE foram abordados e sua compreensão era necessária para entender no momento de simulação o que representavam os dados obtidos e como retirar informações úteis para o desenvolvimento deste trabalho.

Como exemplo de medição de desempenho, a Anatel desenvolveu testes em algumas das cidades que servirão de sede para a Copa do Mundo FIFA em 2014. A Figura 43 mostra um quadro de testes realizado na cidade de Salvador em maio de 2013, onde pontos de medição foram definidos e através de *Drive-tests* mediram somente a potência do sinal das quatro fornecedoras do serviço 4G. Dentre as medições realizadas também pode-se observar medidas no sinal 3G dos mesmos pontos.

**Resumo dos pontos FIFA em Salvador no dia 03/05/2013**

		Claro		Oi		TIM		Vivo	
	Rc	UMTS	LTE	UMTS	LTE	UMTS	LTE	UMTS	LTE
<b>Estádios e Centro de Treinamento</b>									
Arena Fonte Nova	2	Boa	De -102 a -110	Boa	De -110 a -120	Boa	De -110 a -120	Boa	De -95 a -102
Estádio Roberto Santos ( Pituaçu )	1	Boa	Maior que -95	Boa	De -102 a -110	Boa	De -102 a -110	Boa	Maior que -95
Estádio Manoel Barradas ( Barradão )	1	Boa	De -102 a -110	Boa	De -110 a -120	Boa	De -110 a -120	Boa	De -102 a -110
Centro de Treinamento Esporte Clube Bahia	1	Boa	De -110 a -120	Regular	De -110 a -120	Boa	De -110 a -120	Boa	De -110 a -120
<b>Hoteis</b>									
Bahia Othon Palace	2	Boa	Maior que -95	Boa	Maior que -95	Boa	Maior que -95	Boa	Maior que -95
Pestana Bahia Hotel	3	Boa	Maior que -95	Boa	De -110 a -120	Boa	De -110 a -120	Boa	De -95 a -102
Mercure Hotel Salvador Rio Vermelho	3	Boa	Maior que -95	Boa	De -110 a -120	Boa	De -110 a -120	Boa	De -110 a -120
Hotel Matiz Salvador	1	Boa	Maior que -95	Boa	Maior que -95	Boa	Maior que -95	Boa	Maior que -95
IBIS Salvador Rio Vermelho	3	Boa	Maior que -95	Boa	De -110 a -120	Boa	De -110 a -120	Boa	De -110 a -120
Gran Hotel Stella Maris Resort e Conventions	1	Boa	Maior que -95	Boa	Maior que -95	Boa	Maior que -95	Boa	De -102 a -110
Catussaba Sultes Salvador	1	Boa	De -95 a -102	Boa	De -110 a -120	Boa	De -110 a -120	Regular	De -110 a -120
Hotel Deville Salvador	1	Boa	De -102 a -110	Boa	De -110 a -120	Boa	De -110 a -120	Boa	De -95 a -102
<b>Transporte</b>									
Estacionamento Vitória	2	Boa	Maior que -95	Boa	De -110 a -120	Boa	De -102 a -110	Boa	Maior que -95
Centro de Convenções	1	Boa	Maior que -95	Boa	De -95 a -102	Boa	De -95 a -102	Boa	De -95 a -102
Aeroporto Internacional Luis Eduardo Magalhães	1	Boa	De -110 a -120	Boa	De -110 a -120	Boa	De -110 a -120	Boa	Maior que -95
Estacionamento São Raimundo	2	Boa	Maior que -95	Boa	De -102 a -110	Boa	Maior que -95	Boa	De -95 a -102
Getran 1	2	Boa	Maior que -95	Boa	De -102 a -110	Boa	Maior que -95	Boa	Maior que -95
Getran 2	2	Boa	Maior que -95	Boa	De -102 a -110	Boa	Maior que -95	Boa	Maior que -95
Estacionamento da SEPLAG/SEMGE	2	Boa	Maior que -95	Boa	De -102 a -110	Boa	Maior que -95	Boa	Maior que -95
Estacionamento da UFBA Ondina	2	Boa	Maior que -95	Boa	De -102 a -110	Boa	De -95 a -102	Boa	Maior que -95
Estacionamento PAF1 e PAF2	2	Boa	De -95 a -102	Boa	De -95 a -102	Boa	De -95 a -102	Boa	De -95 a -102
Convento do Desterro	2	Boa	De -102 a -110	Boa	De -110 a -120	Boa	De -110 a -120	Boa	De -102 a -110
Estacionamento do Ministério Público	2	Boa	De -102 a -110	Boa	De -102 a -110	Boa	De -102 a -110	Boa	Maior que -95
<b>Instalações</b>									
Accreditation . Convento do Desterro	2	Boa	De -102 a -110	Boa	De -110 a -120	Boa	De -110 a -120	Boa	De -102 a -110
Ticketing Centers, Shopping Center Iguatemi	3	Boa	Maior que -95	Boa	De -95 a -102	Boa	De -95 a -102	Boa	Maior que -95
<b>Hospitais de Referência</b>									
Allança	3	Boa	Maior que -95	Boa	Maior que -95	Boa	Maior que -95	Boa	Maior que -95
São Raphael	1	Boa	De -102 a -110	Boa	De -102 a -110	Boa	De -102 a -110	Boa	Maior que -95
Hospital Geral do Estado	2	Regular	De -102 a -110	Boa	Maior que -95	Boa	Maior que -95	Boa	Maior que -95
Hospital Central Roberto Santos	1	Boa	De -102 a -110	Boa	Maior que -95	Boa	Maior que -95	Boa	Maior que -95
Hospital Português	2	Boa	De -102 a -110	Boa	De -102 a -110	Boa	De -102 a -110	Boa	Maior que -95
Instituto Cardio Pulmonar	2	Boa	Maior que -95	Boa	De -110 a -120	Boa	De -110 a -120	Boa	Maior que -95

UMTS (3G) / LTE (4G)



Figura 43 – Quadro de medições realizadas pela ANATEL na cidade de Salvador em diferentes pontos(ANATEL, 2013).

Pode-se notar pelo documento apresentado pela ANATEL (Agência Nacional de

Telecomunicações), que o único parâmetro considerado como indicador de qualidade da rede foi a potência do sinal recebida pelo UE. Medir somente este parâmetro não garante que realmente o sistema como um todo esteja funcionando com nível de qualidade exigido para tecnologia 4G. Existem, como foi mencionando no trabalho aqui descrito, diversos indicadores que permitem de uma forma mais confiável saber a qualidade no qual o serviço está sendo oferecido. Esse foi um dos motivos que impulsionou a criação de KPI's que oferecessem uma melhor resposta sobre o funcionamento da rede móvel.

Indicadores de desempenho que possam ser medidos e utilizados para efetuar eventuais melhorias do sistema de telefonia móvel e aproveitando o fato da ocorrência de eventos esportivos onde estarão conectados muitos usuários ao mesmo tempo realizar testes e comprovar a eficácia desses parâmetros propostos.

Como observou-se, a inserção das femtocélulas melhora a robustez do sistema celular principalmente no escoamento de tráfego e não permite que os *eNodeB*'s não sofram sobrecarregamento devido ao grande número de UE's conectados. No caso de um sistema que receberá centenas ou milhares de usuários conectados simultaneamente a proposta seria instalar um número maior de femtocélulas de modo que se consiga garantir a qualidade no *throughput* e na cobertura de sinal aumentando assim o valor dos indicadores de qualidade e desempenho.

Os KPI's apresentados nas seções anteriores foram elaborados e desenvolvidos para ajudar as operadoras ou agências fiscalizadoras no monitoramento do desempenho do sistema. Dentre os dois indicadores, somente o segundo foi possível obter simulações e dados que ajudassem a medir os valores do KPI em um sistema simples e outro utilizando femtocélulas.

O resultado obtido mostrou que para uma rede congestionada que sofre queda do seu desempenho e nos valores dos indicadores, a utilização de femtocélulas faz com que a rede melhore seu comportamento, aumentando o valor do KPI proposto medido. No caso do nosso principal estudo de caso, onde se tem centenas de aparelhos conectados a um conjunto restrito de *eNodeB*'s, mostrou-se extremamente importante a tomada de medidas para aliviar essa alta demanda de dados por parte das estações-base, e a melhor medida seria a inserção de femtocélulas para ajudar no escoamento de dados sem prejudicar a qualidade dos serviços.

Um ponto a ser destacado sobre inserir femtocélulas na rede, seria a realização do estudo sobre qual seria o melhor posicionamento dos aparelhos e a quantidade necessária para manter a qualidade dos serviços dentro dos valores exigidos para o sistema 4G no caso.

De acordo com estudos realizados pelo site *www.opensignal.com*, o Brasil ocupa a terceira posição em termos de velocidade média de transferência 4G com 21Mb/s. Esse



site também possui uma plataforma que utiliza um aplicativo desenvolvido para usuários *Android* e *iOS*, através do aplicativo os aparelhos medem características do sinal e com isso realizam o mapeamento de cobertura do sinal, seja ele 2G, 3G ou 4G. Um exemplo de mapeamento do sinal 4G na cidade de Brasília ilustrado na Fig. 44 mostra a cidade de Brasília e principalmente nos arredores do estádio nacional a situação de cobertura do sistema 4G.

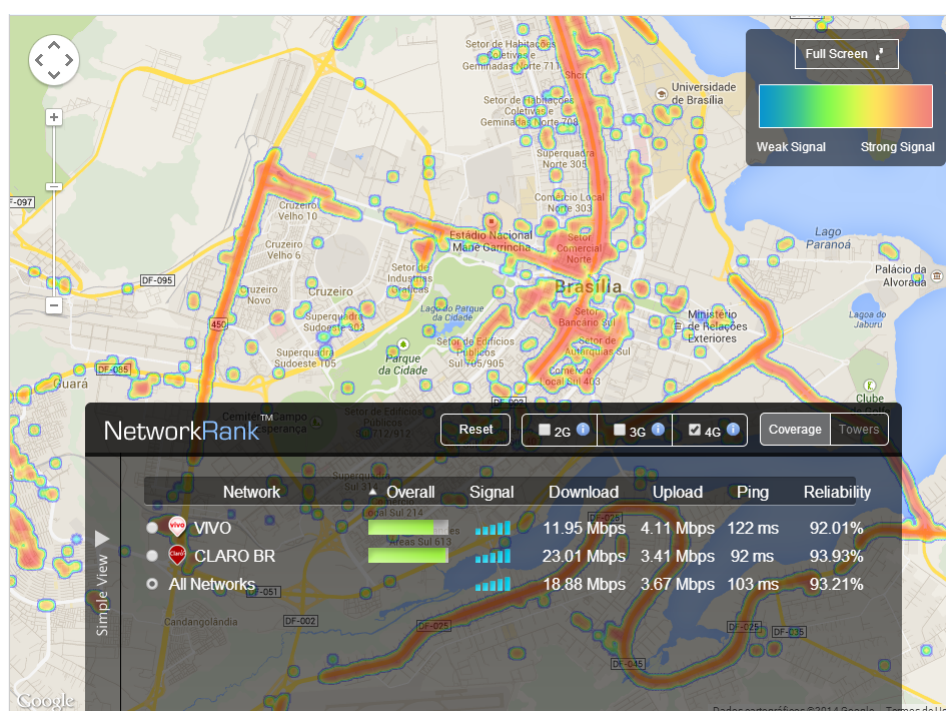


Figura 44 – Mapeamento 4G e características do sinal segundo operadoras para a cidade de Brasília retirado do site ([www.opensignal.com](http://www.opensignal.com)).

Essa medição utilizando os próprios aparelhos fornece uma visão interessante da rede e parte de cobertura de sinal, porém não podemos tomar como 100% fiéis para análise de desempenho, pois não se tem um controle da quantidade de usuários que estão conectados naquele momento dentre outros parâmetros necessários para medição de qualidade e desempenho.

## 6.2 Trabalhos Futuros

Ao concluir este trabalho deixa-se para os próximos uma visão superficial do histórico das redes celulares e como foram se sucedendo as tecnologias e topologias de rede móvel.

O estudo da tecnologia LTE para redes 4G, sendo abordado características de arquitetura, camada física apresentando principais componentes da estrutura e modelos de canal utilizados para modelagem do sistema nos principais simuladores.

O tema principal do trabalho apresentando os indicadores de qualidade e performance serve para esclarecer e mostrar a importância de cada um quando deseja-se verificar o funcionamento da rede. Com isso abrem-se oportunidades para trabalhos futuros promoverem a proposta para outros indicadores.

Outros simuladores podem ser procurados, buscando outros tipos de dados que possam ser explorados para prover melhores informações e resultados de performance de rede. O *software Cellplan* disponível num dos laboratórios da Universidade de Brasília é uma das possibilidades que podem ser utilizadas pois até pouco antes do término deste trabalho foram inseridos dados geográficos da cidade de Brasília e diversas opções de configuração do sistema celular. Um exemplo do *software Cellplan* e como ele se pode ser utilizado nos estudos, tem-se a Fig. 45 que mostra um exemplo de propagação do sinal e perdas de caminho na região da cidade de Brasília onde se localiza o estádio nacional.

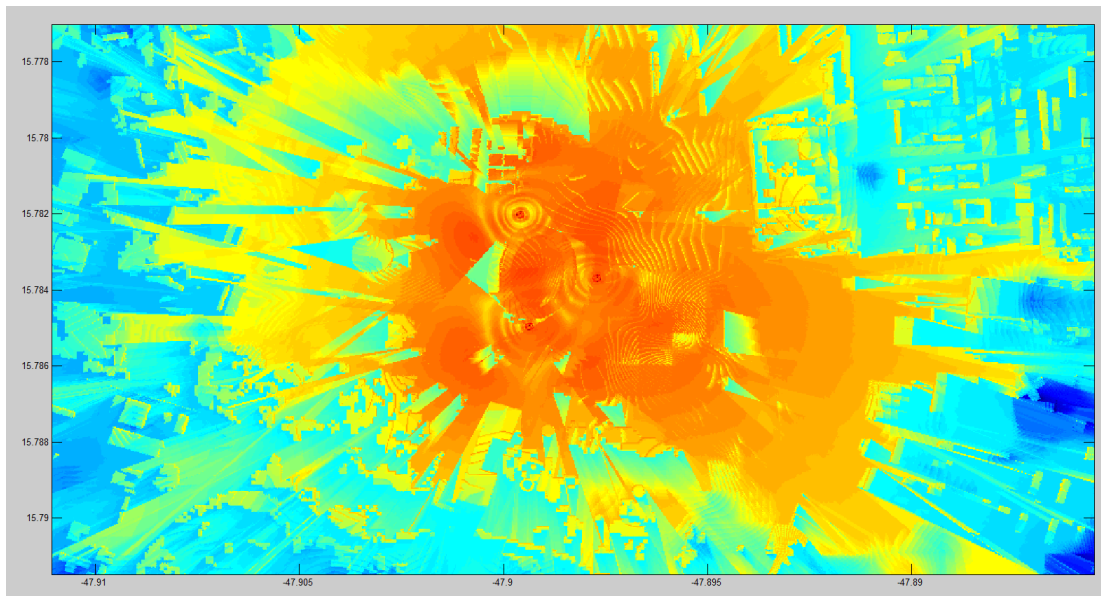


Figura 45 – Mapa da região de Brasília obtida com o *software CellPlan* ilustrando a propagação do sinal proveniente de três *eNodeB's* instalados.

Pela Figura 45 apresentada tem-se no centro da região com coloração avermelhada o setor onde estão instalados três *eNodeB's*, pode-se verificar que o sinal sofre degradação ao longo da distância radial até o centro devido às construções encontradas pelo percurso de propagação. Esses dados podem ser aproveitados e contribuir com mais detalhes e confiabilidade nos estudos.

Ao final, espera-se que este trabalho seja útil e ajude os próximos estudos na área de telecomunicações, que desenvolvam-se mais e mais ferramentas e ajudem a melhorar as redes de comunicações móveis.

# Referências

- 3GPP. *Technical Specification 36.211: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation*. [S.l.], 2009. Citado na página 50.
- 3GPP. *Technical Specification 36.213: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures*. [S.l.], 2009. Citado na página 68.
- 3GPP. *Technical Specification 36.300: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN)*. [S.l.], 2010. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 63.
- ADACHI, F.; NAKAJIMA, N. Challenges os wirelles communications - imt-2000 and beyond. In: IEICE TRANS. FUNDAMENTALS. [S.l.], 2000. Citado na página 39.
- AL-SHAHRANI, A.; AL-OLYANI, H. *LTE: Project EE-424*. 2009. 21 p. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 48.
- ANATEL. *Apresentação: Cobertura 3G/4G para a Copa das Confederações*. Disponível em <http://www.anatel.gov.br/Portal/>. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 93.
- ANRITSU. *LTE Resource Guide*. 2010. Citado 5 vezes nas páginas 15, 48, 49, 50 e 51.
- CARRASCO, J. F. E. A. G. *Análise de desempenho dos sistemas LTE e LTE-Advanced com base em simuladores*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Técnica de Lisboa, 2011. Citado 15 vezes nas páginas 15, 16, 19, 31, 44, 50, 55, 56, 58, 65, 67, 68, 69, 70 e 71.
- COX, C. *An Introduction to LTE, LTE, LTE-Advanced, SAE and 4G Mobile Communications*. [S.l.: s.n.], 2012. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 63.
- ESPÍNDOLA, B. do N. *LTE: Estudo da Estimação de canal em um Cenário Multiusuário*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011. Citado na página 37.
- HAARDT, M.; MOHR, W. The complete solution for third-generation wireless communications: two modes on air, one winning strategy. In: IEEE PERSONAL COMMUNICATIONS. [S.l.], 2000. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 40.
- HAYKIN, S.; MOHER, M. *Sistemas Modernos de Comunicações Wireless*. primeira edição. [S.l.]: Bookman, 2008. Citado na página 57.
- HOLMA, H.; TOSKALA, A. *LTE for UMTS - OFDMA and SC-FDMA Based radio Access*. [S.l.: s.n.], 2009. Citado 5 vezes nas páginas 15, 43, 45, 46 e 49.
- HOLMA, H.; TOSKALA, A. *WCDMA for UMTS: HSPA Evolution and LTE*. [S.l.: s.n.], 2010. Citado na página 47.
- IKUNO, J. C.; WRULICH, M.; RUPP, M. System level simulation of LTE networks. In: *Proc. 2010 IEEE 71st Vehicular Technology Conference*. Taipei, Taiwan: [s.n.], 2010. Citado na página 73.

MARWAT, S. N. K. *LTE Channel Modelling for System Level Simulations*. Dissertação (Mestrado) — University of Bremen, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 56, 59 e 60.

NASCIMENTO, J. F. N. do. *Análise de Desempenho em Redes Móveis*. Dissertação (Mestrado) — Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2012. Citado na página 45.

PCTEL. *Maximizing LTE Performance Through MIMO Optimization*. 2011. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 53.

RAPPAPORT, T. S. *Comunicações sem fio, princípios e práticas*. segunda edição. [S.l.]: Pearson, 2009. Citado 7 vezes nas páginas 15, 31, 37, 38, 39, 57 e 58.

RUMNEY, M. *LTE and the Evolution to 4G Wireless*. [S.l.]: Agilent, 2009. 3,4,5,6 p. Citado na página 40.

RYSAVY, R. *4G America, Mobile Broadband Explosion: The 3GPP Wireless Evolution*. 2012. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 41.

ZARRINKOUB, H. *Understanding LTE with MATLAB, from mathematical modeling to simulation and prototyping*. [S.l.: s.n.], 2014. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 42.